

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

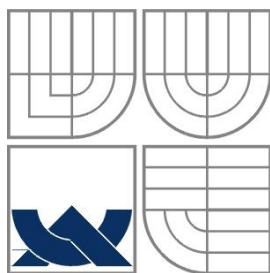
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## ANALÝZA PARAMETRŮ NÁHRADNÍCH ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

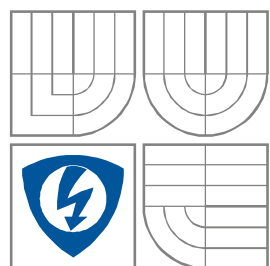
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ONDŘEJ MINKS



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

# **ANALÝZA PARAMETRŮ NÁHRADNÍCH ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU**

**PARAMETER ANALYSIS OF INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUITS**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**ONDŘEJ MINKS**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. MARTIN MACH**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Ondřej Minks  
**Ročník:** 3

**ID:** 146905  
**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Analýza parametrů náhradních zapojení asynchronního motoru**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši na téma náhradní zapojení asynchronního motoru a měření jeho parametrů.
2. Z měřených charakteristik asynchronního motoru určete parametry pro jeho náhradní zapojení ve tvaru T, gama a inverzní gama článku. A tyto náhradní zapojení vzájemně porovnejte.
3. Proveďte měření na asynchronním motoru pro různé hodnoty napětí. Z těchto měření určete napěťové závislosti jednotlivých parametrů náhradních zapojení.
4. Vytvořte model asynchronního motoru platný pro různé napěťové úrovně.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003- 6.
- [2] Fitzgerald A. E., Kingsley Jr. Ch., Umans S. Electric Machinery. McGraw-Hill Science, 2002. 704 s. ISBN: 0073660094.
- [3] Boldea I., Tutelea L. N. Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB. CRC Press, 2009. 797 s. ISBN: 1420055720.

**Termín zadání:** 27.9.2013

**Termín odevzdání:** 2.6.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Mach  
**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá určením parametrů asynchronního motoru pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku,  $\Gamma$ -článku a  $\Pi$ -článku z měření naprázdno a zjištěním napěťové závislosti parametrů. Pro každé z těchto zapojení stanovuje závislosti momentu a statorového proudu na skluzu. Pomocí programu MATLAB jsou díky simulacím teoreticky odvozené závislosti srovnány se skutečnými, změřenými na motoru s kotvou nakrátko o výkonu 0,6 kW,  $2p = 2$ , a to jak v pracovní, tak i v celé motorické oblasti.

## **Abstract**

This work deals with the determination of the parameters of induction motor equivalent circuits in T-network, gamma-network and inverted gamma-network form from no-load test and discovering voltage dependence of these parameters. For each of these circuits are determined dependencies of the torque and the stator current on the slip. Using the MATLAB simulations, the theoretically derived dependencies are compared with real, which are measured on the motor with the squirrel-cage rotor with power 0,6 kW,  $2p = 2$ , both in operating and in whole motor area.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor; analýza parametrů; náhradní zapojení; T-článek; Gamma-článek; inverzní Gamma-článek; moment; momentová charakteristika; statorový proud

## **Keywords**

Induction motor; analysis of parameters; equivalent circuit; T-network; Gamma-network; inverted Gamma-network; torque; torque characteristic; stator current

## **Bibliografická citace**

MINKS, O. *Analýza parametrů náhradních zapojení asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Analýza parametrů asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

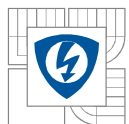
Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Machovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

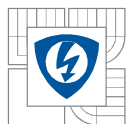
Podpis autora .....



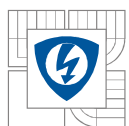
## OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBVODOVÝ MODEL A PARAMETRY ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 STANOVENÍ PŘEVODU MOTORU .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 PŘEVOD NAPĚTÍ .....	16
2.1.2 PŘEVOD PROUDU .....	16
2.1.3 PŘEVOD IMPEDANCÍ .....	17
2.1.3.1 Motor s kroužkovou kotvou .....	17
2.1.3.2 Motor s kotvou nakrátko .....	17
<b>2.2 ROZDĚLENÍ VÝKONU ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 ODPOR VSTUPNÍHO VINUTÍ .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 ODPOR REPREZENTUJÍCÍ ZTRÁTY V ŽELEZE A MAGNETIZAČNÍ REAKTANCE .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5 ROZPTYLOVÁ INDUKČNOST STATORU A ROTORU .....</b>	<b>22</b>
<b>2.6 ROTOROVÝ ODPOR PŘEPOČTENÝ NA STRANU STATORU .....</b>	<b>22</b>
<b>3 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 VÝCHOZÍ ZAPOJENÍ ČLÁNKU .....</b>	<b>23</b>
3.1.1 ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU .....	24
3.1.2 ODVOZENÍ MOMENTU V ZÁVISLOSTI NA SKLUZU .....	24
3.1.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	26
<b>3.2 ZAPOJENÍ VE TVARU T-ČLÁNKU .....</b>	<b>27</b>
3.2.1 ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU .....	28
3.2.2 ODVOZENÍ MOMENTU V ZÁVISLOSTI NA SKLUZU .....	29
3.2.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	30
<b>3.3 ZAPOJENÍ VE TVARU Γ-ČLÁNKU .....</b>	<b>32</b>
3.3.1 ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU .....	32
3.3.2 ODVOZENÍ MOMENTU V ZÁVISLOSTI NA SKLUZU .....	33
3.3.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	34
<b>3.4 ZAPOJENÍ VE TVARU T-ČLÁNKU .....</b>	<b>35</b>
3.4.1 ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU .....	35
3.4.2 ODVOZENÍ MOMENTU V ZÁVISLOSTI NA SKLUZU .....	36
3.4.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	37
<b>4 ZKOUŠENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 ZKOUŠKA NAKRÁTKO .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO .....</b>	<b>39</b>
<b>4.3 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ .....</b>	<b>40</b>
<b>5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>41</b>
<b>5.1 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA .....</b>	<b>41</b>
<b>5.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO .....</b>	<b>41</b>
<b>5.3 ZKOUŠKA NAKRÁTKO .....</b>	<b>41</b>
<b>6 VYPOČTENÉ PARAMETRY .....</b>	<b>42</b>



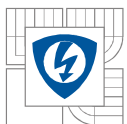


6.1 VÝPOČET PARAMETRŮ $R_0$ A $\omega L_0$ PRO STANOVENÍ PŘÍČNÉ VĚTVE .....	42
6.2 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO T-ČLÁNEK .....	42
6.3 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO $\Gamma$ -ČLÁNEK .....	43
6.4 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO $\tilde{T}$ -ČLÁNEK.....	43
7 SROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK MOTORU .....	44
7.1 PROUDOVÉ CHARAKTERISTIKY PRO JEDNOTLIVÁ NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ .....	44
7.2 MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY PRO JEDNOTLIVÁ NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ .....	44
7.3 NAMĚŘENÉ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY V POROVNÁNÍ S VYPOČTENÝMI .....	45
8 ZÁVĚR.....	49
LITERATURA .....	51
PŘÍLOHY .....	52
P-1: ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU PRO VÝCHOZÍ ČLÁNEK .....	52
P-2: ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU PRO T-ČLÁNEK .....	53
P-3: ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI MOMENTU NA SKLUZU PRO T-ČLÁNEK .....	54
P-4: ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU PRO $\tilde{T}$ -ČLÁNEK .....	55
P-5: PARAMETRY MOTORU .....	56
P-6: CELKOVÉ VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY.....	56
P-7: CELKOVÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	57
P-8: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY ODPORU $R_{FE}$ .....	57
P-9: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY INDUKČNOSTI $L_M$ .....	58
P-10: PROUDOVÁ ZÁVISLOST ZMĚŘENÝCH PARAMETRŮ PODÉLNÉ VĚTVE .....	59
P-11: NAPĚŤOVÁ ZÁVISLOST VYPOČTENÝCH PARAMETRŮ PŘÍČNÉ VĚTVE.....	60
P-12: UKÁZKA MĚŘENÉHO ZAŘÍZENÍ.....	61



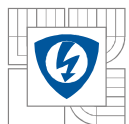
## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru T-článku .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-2: Princip klecového vinutí [1] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-3: Tok výkonu asynchronního motoru [6] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-4: Zapojení vstupního vinutí asynchronního motoru do hvězdy .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-1: Momentová charakteristika asynchronního stroje [6] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-2: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru výchozího článku [6] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-3: Celková impedance při měření naprázdno .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-4: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru výchozího článku .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-5: Upravené náhradní zapojení jedné fáze ASM tvaru T-článku .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3-6: Závislost statorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-7: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3-8: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení v tvaru T-článku .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-9: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru Γ-článku .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-10: Závislost statorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru Γ-článku .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3-11: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru Γ-článku .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-12: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení v tvaru Γ-článku .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-13: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru I-článku .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3-14: Závislost statorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru I-článku .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-15: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru I-článku .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-1: Charakteristiky nakrátko asynchronního motoru [2] .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-2: Náhradní schéma asynchronního motoru při měření nakrátko .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-3: Rozdělení ztrát v železe a ztrát mechanických .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 7-1: Srovnání vypočtených proudových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 7-2: Srovnání vypočtených momentových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7-3: Srovnání naměřené proudové charakteristiky s vypočtenými .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7-4: Srovnání naměřené momentové charakteristiky s vypočtenými .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7-5: Naměřená pracovní oblast zatěžovací charakteristiky motoru ATAS T22VT512 (7-0512) .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7-6: Srovnání pracovních oblastí naměřené momentové charakteristiky s vypočtenými .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7-7: Srovnání pracovních oblastí naměřené proudové charakteristiky s vypočtenými .....</i>	<i>48</i>



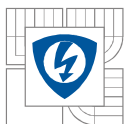
## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Výsledky zkoušky naprázdno motoru AOM090L02-016.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 2: Výsledky měření nakrátko pro motor AOM090L02-016.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 3: Celkové výsledky měření zatěžovací charakteristiky pro motor ATAS T22VT512 (7-0512) .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 4: Výsledky měření naprázdno pro motor ATAS T22VT512 (7-0512).....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 5: Srovnání hodnot odporu <math>R_{Fe}</math> získaného přímým výpočtem a výpočtem pro jednotlivá náhradní zapojení pro různá vstupní napětí motoru ATAS T22VT512 (7-0512).....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6: Srovnání hodnot indukčnosti <math>L_{\mu}</math> získané přímým výpočtem a výpočtem pro jednotlivá náhradní zapojení pro různá vstupní napětí motoru ATAS T22VT512 (7-0512).....</i>	<i>58</i>

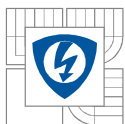


## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

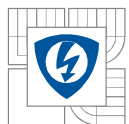
$\cos\varphi$	-	účinník
$f$	Hz	frekvence
$F$	A	magnetické napětí
$I_1$	A	komplexní hodnota statorového proudu (efektivní hodnota)
$I_{1n}$	A	komplexní hodnota jmenovitého statorového proudu (efektivní hodnota)
$I_2$	A	komplexní hodnota rotorového proudu (efektivní hodnota)
$I_2^{'}$	A	komplexní hodnota rotorového proudu přepočteného na stator (efektivní hodnota)
$I_0$	A	komplexní hodnota magnetizačního proudu (efektivní hodnota)
$I_u$	A	imaginární složka magnetizačního proudu (efektivní hodnota)
$I_{Fe}$	A	reálná složka magnetizačního proudu (efektivní hodnota)
$I_{10}$	A	efektivní hodnota proudu naprázdno
$I_{1k}$	A	efektivní hodnota proudu nakrátko
$I_t$	A	proud v tyči klece rotoru
$I_d$	A	hodnota stejnosměrného proudu protékajícího mezi dvěma fázemi
$k_{v1}$	-	činitel vinutí statoru
$k_{v2}$	-	činitel vinutí rotoru
$L_{\sigma 1}$	H	rozptylová indukčnost statoru
$L_{\sigma 2}$	H	rozptylová indukčnost rotoru
$L_{\sigma 20}$	H	rozptylová indukčnost rotoru při frekvenci točivého magnetického pole
$L_{\sigma 2}^{'}$	H	rozptylová indukčnost rotoru přepočtená na stator
$L_{\sigma 20}^{'}$	H	rozptylová indukčnost rotoru při frekvenci točivého magnetického pole přepočtená na stator
$L_{\mu}$	H	magnetizační indukčnost
$m$	-	počet fází
$M$	Nm	moment motoru
$N$	-	počet závitů na fázi
$n$	$\text{min}^{-1}$	otáčky motoru
$n_1$	$\text{min}^{-1}$	synchronní otáčky
$P_1$	W	příkon
$P_2$	W	výkon na hřídeli



$P_{10}$	W	příkon naprázdno
$P_{1k}$	W	příkon nakrátko
$P_{el}$	W	elektrický výkon spotřebovaný na všech rotorových činných odporech
$P_{mech}$	W	celkový mechanický výkon
$P_{\delta}$	W	výkon přenášený přes vzduchovou mezeru
$\Delta P_0$	W	ztráty naprázdno
$\Delta P_{j1}$	W	ztráty ve vinutí statoru
$\Delta P_{j2}$	W	ztráty ve vinutí rotoru
$\Delta P_{Fe}$	W	ztráty v železe
$\Delta P_{mech}$	W	mechanické ztráty
$p$	-	počet pólových dvojic
$p_u$	-	napět'ový převod
$p_i$	-	proudový převod
$p_z$	-	impedanční převod
$Q_2$	-	počet drážek
$R_1$	$\Omega$	odpor statorového vinutí
$R$	$\Omega$	odpor rotorového vinutí
$R'$	$\Omega$	odpor rotorového vinutí přepočteného na stator
$R_{Fe}$	$\Omega$	odpor reprezentující ztráty v železe
$R_t$	$\Omega$	odpor tyče
$R_k$	$\Omega$	odpor části kruhu připadající na jednu tyč
$s$	-	skluz
$U_1$	V	komplexní hodnota statorového napětí (efektivní hodnota)
$U_{10}$	V	efektivní hodnota napětí naprázdno
$U_{1k}$	V	efektivní hodnota napětí nakrátko
$U_2$	V	komplexní hodnota rotorového napětí
$U_d$	V	hodnota stejnosměrného napětí mezi dvěma fázemi
$U_i$	V	efektivní hodnota indukovaného napětí
$U_n$	V	efektivní hodnota jmenovitého napětí
$U_{pom}$	-	poměrné napětí
$X_{\sigma 1}$	$\Omega$	rozptylová reaktance statoru
$X_{\sigma 2}$	$\Omega$	rozptylová indukčnost rotoru
$X_{\sigma 20}$	$\Omega$	rozptylová reaktance rotoru při frekvenci točivého magnetického pole



$X'_{\sigma 2}$	$\Omega$	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator
$X'_{\sigma 20}$	$\Omega$	rozptylová reaktance rotoru při frekvenci točivého magnetického pole přepočtená na stator
$X_{t\sigma}$	$\Omega$	rozptylová reaktance tyče
$X_{k\sigma}$	$\Omega$	rozptylová reaktance části kruhu mezi tyčemi
$X_{\mu}$	$\Omega$	hlavní magnetizační reaktance
$\kappa$	-	největší společný dělitel počtu drážek $Q_2$ a počtu pólových dvojic $p$
$\Phi$	Wb	magnetický tok
$\omega$	rad/s	úhlová rychlost
$\omega_1$	rad/s	synchronní úhlová rychlost
$\omega_m$	rad/s	úhlová rychlost rotoru



# 1 ÚVOD

Asynchronní (také jinak indukční) stroje jsou v současnosti nejpoužívanějšími elektrickými stroji. Jejich velkými výhodami jsou hlavně jednoduchá konstrukce a tím i vysoká spolehlivost, vhodný průběh momentové charakteristiky a nízká cena. Tyto střídavé stroje vynalezl ke konci 19. století Nikola Tesla. Současné stroje mohou dosahovat výkonů řádově až MW.

Využívají se jako motory, kdy dochází k přeměně elektrické energie na energii mechanickou. Nejčastěji se používají k pohonům nevyžadujícím změnu rychlosti, protože otáčivá rychlost asynchronního stroje souvisí s rychlostí točivého pole. Avšak mohou také pracovat ve funkci generátorů, kdy z mechanické energie dodávají elektřinu do sítě. Vyskytují se zpravidla trojfázové, motory malých výkonů (přibližně do 1 kW) však mohou být i jednofázové.

Obecně má motor pevný stator a pohyblivý rotor. Mezi nimi je malá vzduchová mezera. Ve statoru složeného ze statorových plechů se nachází vinutí uložené v jeho drážkách po obvodu vzduchové mezery. Vinutí bývá rozložené a jeho konce jsou vyvedeny do svorkovnic. Rotorové vinutí je nejčastěji tvořeno klecí – tyčemi z mědi nebo hliníku, případně mosazi, které jsou spojeny po obou stranách zkratovacími kruhy shodného materiálu. Drážky se vyskytují různých tvarů a mají vliv na průběh točivého momentu motoru v závislosti na rychlosti otáčení a na jeho záběrný moment. Tomuto konstrukčnímu uspořádání říkáme klecový rotor. Druhou možností je tzv. rotor kroužkový, kdy do nosné kostry je vložen magnetický obvod tvořen z dynamoplechů ve tvaru mezikružích, na jejichž povrchu jsou drážky pro uložení vinutí. Toto vinutí je trojfázové, shodného typu jako vinutí statoru a se stejným počtem pólů. Rotorové vinutí je vyvedeno ke třem sběracím kroužkům, které jsou uloženy na ocelovém pouzdru, navlečeném na hřídel. Z nich je možno vést prostřednictvím kartáčků proud ke spouštěcím odporům.

Trojfázová vinutí bývají spojena buď do hvězdy (konec všech fází spojen do jednoho uzlu, začátky připojeny na jednotlivé fáze U, V a W zdroje napětí) nebo do trojúhelníku (konec předešlé fáze vinutí spojen se začátkem následující, uzly jsou připojeny k jednotlivým fázím zdroje).

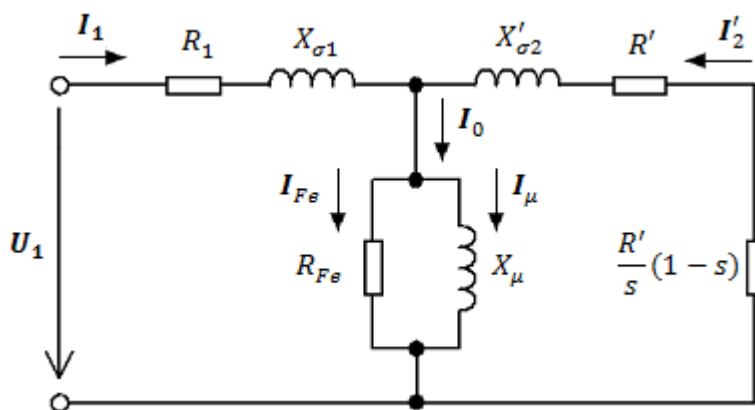
Funkce motoru spočívá ve vytvoření točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře, které je buzeno trojfázovým vinutím statoru. Jednotlivé fáze tohoto vinutí jsou vůči sobě prostorově posunuty o  $120^\circ$  elektrických. Napájení vinutí je prováděno ze souměrné soustavy trojfázových napětí. Tím protéká vinutím souměrná soustava proudů, které jsou vzájemně časově posunuty o  $120^\circ$ , díky čemuž vzniká točivé magnetické pole otáčející se synchronní rychlostí otáčení. Tyto stroje nemají budiče, jsou magnetovány ze statoru připojeného k síti, proto mají co nejmenší vzduchové mezery.

Při zjišťování informací o konkrétním asynchronním motoru (např. k účelům řízení) je třeba znát také jeho parametry. Tyto se určují na základě třech zkoušek – měření naprázdno, měření nakrátko a měření při zatížení.

Práce je zaměřena na analýzu parametrů asynchronního motoru ve tvaru T-článku,  $\Gamma$ -článku a T-článku (inverzního  $\Gamma$ -článku) a dále je pro tato zapojení odvozena závislost statorového proudu a momentu na skluzu a provedeno srovnání těchto závislostí s naměřenými.

## 2 OBVODOVÝ MODEL A PARAMETRY ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Obvodový model asynchronního motoru je znázorněn na Obr. 2-1. Je obdobný náhradnímu zapojení transformátoru. Zapojení ve tvaru T-článku se ve většině literatur vyskytuje nejčastěji. Je uváděno jako přesné náhradní schéma. Ve skutečnosti je však toto zapojení zbytečně složité a jeho přesnost je stejná jako u ostatních článků. Náhradní zapojení ve tvaru  $\Gamma$ -článku i T-článku obsahují vždy pouze jednu hlavní a jednu rozptylovou indukčnost, zatímco v T-článku nacházíme rozptylové indukčnosti dvě. Ve [3] je však ukázán výskyt pouze dvou nezávislých toků, tj. hlavního a rozptylového, a žádným měřením není možné rozdělit tuto jedinou rozptylovou indukčnost na dvě.

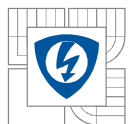


Obr. 2-1: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru T-článku

Význam jednotlivých symbolů (převzato z [7]):

$U_1$	[V]	komplexní hodnota statorového napětí (efektivní hodnota)
$I_1$	[A]	komplexní hodnota statorového proudu (efektivní hodnota)
$I'_2$	[A]	komplexní hodnota rotorového proudu přepočteného na stator (efektivní hodnota)
$I_0$	[A]	magnetizační proud statoru
$I_{Fe}$	[A]	reálná složka magnetizačního proudu
$I_\mu$	[A]	imaginární složka magnetizačního proudu
$R_1$	[ $\Omega$ ]	odpor statorového vinutí
$R'$	[ $\Omega$ ]	odpor rotorového vinutí přepočteného na stator
$R_{Fe}$	[ $\Omega$ ]	odpor reprezentující ztráty v železe
$X_{\sigma 1}$	[ $\Omega$ ]	rozptylová reaktance statoru
$X'_{\sigma 2}$	[ $\Omega$ ]	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator
$X_\mu$	[ $\Omega$ ]	hlavní magnetizační reaktance





Odpor  $\frac{R'}{s}(1-s)$  je tzv. fiktivním odporem. Elektrický výkon spotřebovaný na tomto odporu představuje mechanický výkon na hřídeli.

## 2.1 Stanovení převodu motoru

Pro přepočítání parametrů asynchronního motoru je třeba znát jeho převodní činitele. Jejich stanovení je obdobné jako u transformátoru. Převodní činitele budou stanoveny pro oba typy asynchronního motoru – s kroužkovým i klecovým rotorem.

### 2.1.1 Převod napětí

Převodní činitele asynchronního motoru mezi statorovým a rotorovým napětím lze podle [2] odvodit z poměru vnitřních napětí statoru:

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \phi_1 \quad (2.1.1)$$

a rotoru:

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi_2, \quad (2.1.2)$$

kde  $k_{v1}$  [-] činitel vinutí statoru,

$k_{v2}$  [-] činitel vinutí rotoru.

Jejich poměrem je získán převod napětí  $p_u$ :

$$p_u = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \quad (2.1.3)$$

Pozn.: U motorů s kroužkovým rotorem je v praxi převod napětí určen z tzv. kroužkového napětí stroje v klidu  $U_{20}$ , které je přítomno mezi kroužky kotvy při otevřeném rotorovém vinutí, je-li do statoru přivedeno trojfázové jmenovité napětí  $U_{1n}$ . Toto se užívá také k návrhu motoru a je obdobné postupu při stanovování převodu u transformátoru naprázdno [2].

### 2.1.2 Převod proudu

V [2] je ukázáno, že pro stanovení převodu proudu se vychází z rovnosti magnetických napětí  $F_1 = F_2$  stanovených pro proudy  $I'_2$ , případně  $I_2$ :

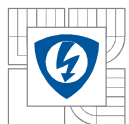
$$F_1 = \frac{m_1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{p} \cdot I'_2 \quad (2.1.4)$$

a rotoru

$$F_2 = \frac{m_2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{N_2 \cdot k_{v2}}{p} \cdot I_2 \quad (2.1.5)$$

Ze vzájemné rovnosti magnetických napětí vyplývá převod proudů  $p_i$ :

$$p_i = \frac{I'_2}{I_2} = \frac{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}}{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} \quad (2.1.6)$$



Pro porovnání je z [4] také vidět, že součet proudů tekoucích statorovým a rotorovým (přepočteným na stranu statoru) vinutím je roven magnetizačnímu proudu statoru:

$$I_1 - I_2 \frac{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}}{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = I_0, \quad (2.1.7)$$

Rovnici (2.1.7) lze upravit do následujícího tvaru:

$$I_1 - I'_2 = I_0 \quad (2.1.8)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že přepočet rotorového proudu na stranu statoru je uskutečněn pomocí proudového převodu.

### 2.1.3 Převod impedancí

#### 2.1.3.1 Motor s kroužkovou kotvou

Pro motor s kroužkovou kotvou je převod stanoven obdobně také pro impedance. Ten je z [2] určen podle podmínky neměnnosti ztrát Joulovým teplem, patřících skutečnému vinutí rotoru či myšlenému vinutí statoru:

$$m_2 \cdot R \cdot I_2^2 = m_1 \cdot R' \cdot I_2'^2 \quad (2.1.9)$$

Při použití vztahu ( $p_i$ ) poté po úpravě:

$$R' = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2 \cdot R \quad (2.1.10)$$

Převod impedancí  $p_z$  je roven:

$$p_z = \frac{R'}{R} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2 \quad (2.1.11)$$

Odpor rotorového vinutí přepočtený na stranu statoru je tedy:

$$R' = p_z \cdot R \quad (2.1.12)$$

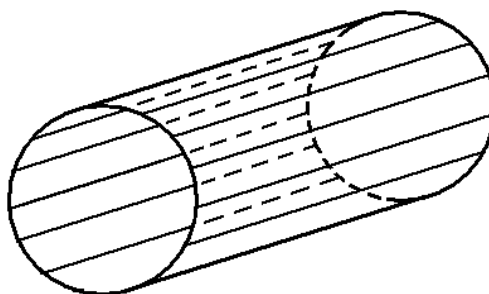
a rozptylová reaktance rotorového vinutí:

$$\frac{X'_{2\sigma}}{X_{2\sigma}} = \frac{R'}{R}, \quad (2.1.13)$$

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot p_u^2 \quad (2.1.14)$$

#### 2.1.3.2 Motor s kotvou nakrátko

V rámci práce bude při měření použit motor s kotvou nakrátko (s klecovým vinutím rotoru). Obecně je klec tvořena tyčemi (např. měděnými), které jsou uloženy v drážkách rotoru a jsou spojeny v každém čele rotoru kruhem nakrátko (Obr. 2-2 [1]). Klec je vhodná pro různé počty pólů  $2p$  a její výroba je levná.



Obr. 2-2: Princip klecového vinutí [1]

Uvažme, že klec obsahuje  $Q_2$  tyčí, které jsou vpředu i vzadu spojeny kruhem nakrátko. Jednovrstvová klec má stejný počet tyčí jako drážek. Při návrhu klece mohou nastat dva případy. V prvním není počet drážek soudělný s počtem pólových dvojic, v druhém případě má počet drážek určitou společnou míru s počtem pólových dvojic [1].

### Počet drážek není soudělný s počtem pólových dvojic

Není-li počet drážek  $Q_2$  soudělný s počtem pólových dvojic  $p$ , pak bude počet fází klece  $m_2 = Q_2$ . Fázový proud  $I_2$  je roven proudu, který protéká tyčí  $I_t$ , počet závitů na fázi je  $N_2 = 0,5$ , protože pouze jeden vodič připadá na fázi. Činitel vinutí  $k_{v2}$  je proto také roven jedné [1].

Převod impedancí je poté dle (2.1.11):

$$p_z = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2 = \frac{m_1}{Q_2} \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{0,5 \cdot 1} \right)^2 = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \quad (2.1.15)$$

a odpor tyče  $R_t$  je zde zároveň odporem fáze  $R$ , z čehož vyplývá:

$$R' = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot R_t \quad (2.1.16)$$

### Počet drážek je soudělný s počtem pólových dvojic

Pokud má počet drážek  $Q_2$  nejvyšší společnou míru  $\kappa$  s počtem pólových dvojic  $p$ , pak počet fází je roven:

$$m_2 = \frac{Q_2}{\kappa} \quad (2.1.17)$$

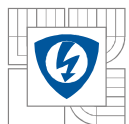
a fázový proud  $I_2$  je  $\kappa$ -krát větší než proud v tyči  $I_t$ , protože  $\kappa$  tyčí je spojeno paralelně v každé fázi. Počet závitů na fázi je opět  $N_2 = 0,5$  a činitel vinutí  $k_{v2}$  roven jedné.

Převod impedancí:

$$p_z = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2 = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2 \kappa}{Q_2}, \quad (2.1.18)$$

Převod  $p_z$  je tedy užíván k přepočtu (např. odporu jedné fáze rotoru na fázi statoru), a protože je v tomto případě  $\kappa$  tyčí spojeno paralelně, pak odpor fáze rotoru je roven:

$$R = \frac{R_t}{\kappa} \quad (2.1.19)$$



Přepočtený odpor klece je poté totožný s (2.1.16), protože odpor rotoru je vyjádřen odporem jedné tyče  $R_t$ :

$$R' = p_z \cdot R = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot \frac{R_t}{\kappa} = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot R_t \quad (2.1.20)$$

K odporu tyče je třeba však ještě připočítat obě přilehlé oblasti kruhů klece, jejichž vliv je v [1] vyjádřen. Odpor jedné fáze rotoru vztažený na proud tyče:

$$R = R_t + \frac{2R_k Q_p^2}{\pi^2}, \quad (2.1.21)$$

kde  $R_k$  [Ω] odpor části kruhu, připadající na jednu tyč.

$Q_p$  je počet tyčí v jedné pólové rozteči:

$$Q_p = \frac{Q_2}{2p} \quad (2.1.22)$$

Výsledný odpor fáze rotoru přepočtený na fázi statoru je dle (2.1.20):

$$R' = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot \left( R_t + \frac{2R_s Q_p^2}{\pi^2} \right) \quad (2.1.23)$$

A obdobně jako ve vztahu (2.1.20) se rozptylová reaktance klecového vinutí rotoru:

$$X_{\sigma 2} = X_{t\sigma} + \frac{2X_{k\sigma} Q_p^2}{\pi^2} \quad (2.1.24)$$

přepočte na fázi statoru [1]:

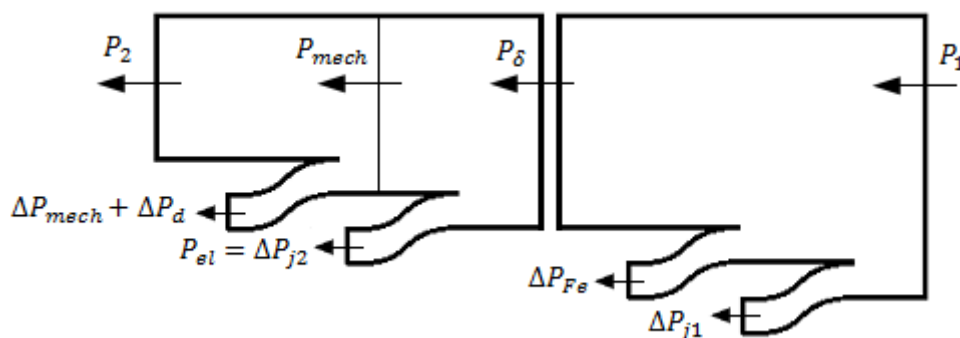
$$X'_{\sigma 2} = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot X_{\sigma 2}, \quad (2.1.25)$$

kde  $X_{t\sigma}$  [Ω] rozptylová reaktance tyče,

$X_{k\sigma}$  [Ω] rozptylová reaktance části kruhu mezi tyčemi [1], [4].

## 2.2 Rozdělení výkonu asynchronního motoru

Jako ve všech zařízeních i u asynchronního motoru dochází vlivem průchodu proudu vinutími, třením a jiným zákonitostem ke ztrátám výkonu. Příkon přiváděný do stroje je zmenšen o ztráty, výsledný výkon na hřídeli stroje proto není s příkonem shodný. Nejvýznamnější energetické úbytky ukazuje Obr. 2-3, kde je vidět tok výkonu asynchronního motoru.



Obr. 2-3: Tok výkonu asynchronního motoru [6]

Z příkonu  $P_1$ , který odebírá motor ze sítě, jsou hrazeny činné ztráty ve vinutí statoru  $\Delta P_{j1}$  a také ztráty v železe (v magnetickém obvodu motoru)  $\Delta P_{Fe}$ .

Výkon přenášený přes vzduchovou mezeru  $P_\delta$  dále prochází do rotoru, v němž vznikají další ztráty, tj. činné ztráty ve vinutí rotoru  $\Delta P_{j2}$ . Zbýlý výkon je tzv. mechanický výkon stroje  $P_{mech}$ , kdy je na stator i rotor působeno totožným momentem  $M$  [6].

Z [6] je dále možno vidět:

$$P_\delta = M \cdot \omega_1 = M \cdot 2\pi \cdot \frac{f_1}{p} = M \cdot 2\pi \cdot n_1 \quad (2.2.1)$$

a

$$P_{mech} = M \cdot \omega = M \cdot \omega \cdot (1 - s) \quad (2.2.2)$$

Z Obr. 2-3 je dále patrné, že

$$P_{el} = P_\delta - P_{mech} = M \cdot (\omega_1 - \omega) , \quad (2.2.3)$$

kde  $P_{el}$  je elektrický výkon, který je spotřebován na všech rotorových činných odporech. Z rovnic (2.2.1) a (2.2.3) vyplývá:

$$\frac{P_{el}}{P_\delta} = M \cdot \frac{\omega_1 - \omega}{M \cdot \omega_1} = s \quad (2.2.4)$$

Díky tomu je možno vidět, že elektrický výkon  $P_{el}$  je roven součinu skluzu a výkonu přenášenému přes vzduchovou mezeru.

$$P_{el} = P_\delta \cdot s \quad (2.2.5)$$

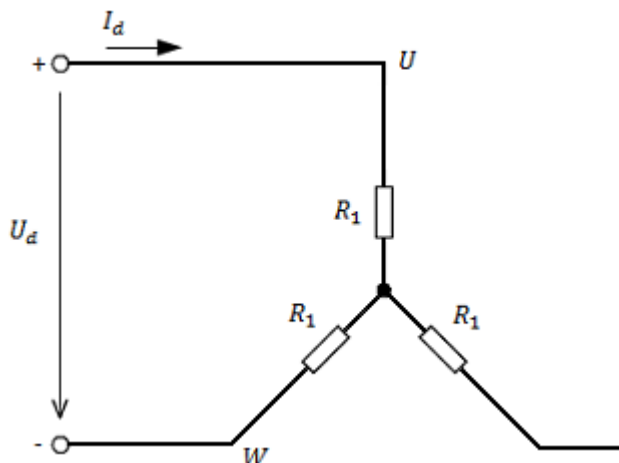
Výkonu  $P_{el}$  se říká skluzový výkon. Jeho změnou je možno řídit otáčky asynchronního motoru.

Celkový mechanický výkon  $P_{mech}$  však není výkon, který je přenášen na hřídel. Tento je ještě snížen o vlastní mechanické ztráty stroje  $\Delta P_{mech}$  a také o dodatečné ztráty  $\Delta P_d$ . Výsledný výkon přenášený na hřídel je tedy:

$$P_2 = P_{mech} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad (2.2.6)$$

## 2.3 Odpor vstupního vinutí

Odpor vstupního vinutí (vinutí statoru) je možno jednoduše změřit stejnosměrnou Ohmovou metodou. Na svorky libovolných dvou fází (např. U a W, viz. Obr. 2-4) se provede připojení stejnosměrného zdroje napětí. Následně jsou změřeny hodnoty stejnosměrného napětí a proudu [5].



Obr. 2-4: Zapojení vstupního vinutí asynchronního motoru do hvězdy

Při zapojení do hvězdy se dle Ohmova zákona vždy pro danou dvojici svorek vypočte odpor podílem poloviny napětí na svorkách a proudu tekoucího vinutím [5]:

$$R'_1 = \frac{U_d}{2 \cdot I_d} \quad (2.3.1)$$

Výsledná hodnota odporu vstupního vinutí je určena aritmetickým průměrem z vypočtených hodnot.

## 2.4 Odpor reprezentující ztráty v železe a magnetizační reaktance

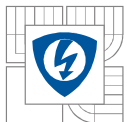
Při stanovování odporu reprezentujícího ztráty v železe  $R_{Fe}$  je nutné, aby měření probíhalo vždy ve stavu naprázdno. Měření je činný příkon  $P_{10}$  při napájení jmenovitým napětím  $U_{10}$  a jmenovitým kmitočtem  $f$  (tomu odpovídá jmenovité syčení železa).

Velikost tohoto odporu poté lze určit ze znalosti příkonu a napájecího napětí pomocí vztahu [7]:

$$R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} \quad (2.4.1)$$

Velmi důležitá je při tomto měření hodnota kmitočtu. Hysterezní ztráty se totiž zvyšují s první mocninou kmitočtu, vířivé ztráty pak s jeho druhou mocninou (za předpokladu, že při změně kmitočtu je udržována konstantní amplituda magnetické indukce v jádře, tedy poměr  $U_{10}/f$ ) [3].

Hlavní magnetizační reaktance je určena dle vztahu [7]:



$$X_{\mu} = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} \cdot I_{10}} \sin \left[ \arccos \left( \frac{P_{10}}{\sqrt{3} \cdot U_{10} \cdot I_{10}} \right) \right] \quad (2.4.2)$$

## 2.5 Rozptylová indukčnost statoru a rotoru

Při měření nakrátko jsou změřeny hodnoty odporů a reaktancí podélné větve. Celková rozptylová reaktance je tedy vypočtena následným vztahem [7]:

$$X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2} = \sqrt{\left( \frac{U_{1k}}{\sqrt{3} I_{1k}} \right)^2 - \left( \frac{P_k}{3 I_k^2} \right)^2}, \quad (2.5.1)$$

z něhož lze úpravou zjistit celkovou rozptylovou indukčnost:

$$L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} = \frac{\sqrt{\left( \frac{U_{1k}}{\sqrt{3} I_{1k}} \right)^2 - \left( \frac{P_k}{3 I_k^2} \right)^2}}{2\pi f} \quad (2.5.2)$$

## 2.6 Rotorový odpor přepočtený na stranu statoru

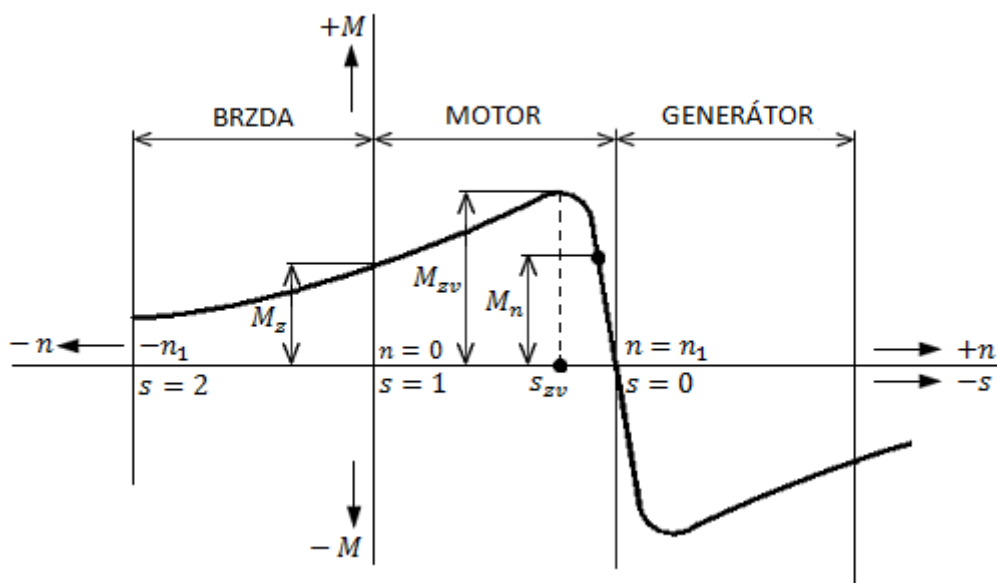
Hodnota rotorového odporu přepočteného na stranu statoru je známa díky změřenému odporu vstupního vinutí  $R_1$  a příkonu  $P_{1k}$  a proudu  $I_{1k}$  zjištěných při měření nakrátko [7]:

$$R' = \frac{P_{1k}}{3 I_{1k}^2} - R_1 \quad (2.6.1)$$

### 3 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

V této práci budou zmíněna celkem čtyři náhradní zapojení asynchronního motoru, a to ve tvaru výchozího članku, T-članku,  $\Gamma$ -članku a  $\pi$ -članku. Zapojení ve tvaru výchozího članku však není považováno za přesnou náhradu a v práci je díky své jednoduchosti uvažováno pouze k pochopení problematiky. Všeobecně je ovšem možných variant náhradních zapojení velké množství. Důležité je zmínit, že parametry jednotlivých náhradních zapojení nejsou ekvivalentní.

Pro výše zmíněná zapojení bude dále určena závislost momentu motoru na skluzu  $M = f(s)$ . Momentová charakteristika je závislost točivého momentu motoru na jeho skluzu (či otáčkách) při jmenovitém, případně i jiném statorovém napětí. Tato charakteristika slouží pro posouzení vlastností motoru. Průběh momentové charakteristiky asynchronního stroje je vyobrazen na Obr. 3-1.



Obr. 3-1: Momentová charakteristika asynchronního stroje [6]

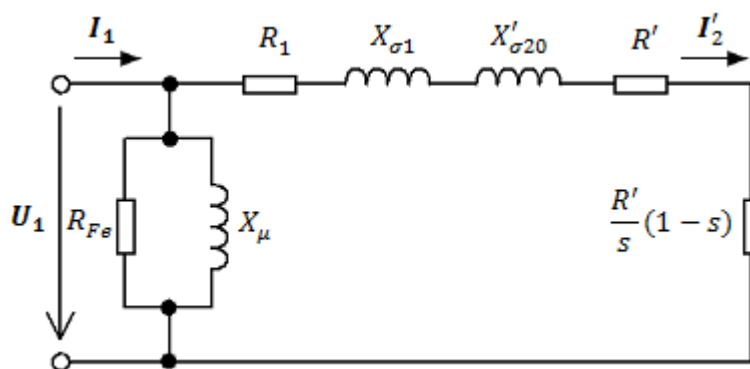
Význam jednotlivých symbolů:

$M_z$	[Nm]	záběrný moment
$M_{zv}$	[Nm]	moment zvratu (maximální moment)
$M_n$	[Nm]	jmenovitý moment
$s_{zv}$	[-]	skluz zvratu

#### 3.1 Výchozí zapojení članku

Toto zapojení představuje mnohá zjednodušení a není proto zcela přesné. Dochází v něm k přesunutí příčné větve na úplný začátek svorek. Díky tomu lze dostat velkého zjednodušení při odvození závislosti momentu stroje na skluzu, protože podélná větev představuje prostou sériovou kombinaci.





Obr. 3-2: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru výchozího článku [6]

### 3.1.1 Odvození závislosti satorového proudu na skluzu

Závislost satorového proudu na skluzu pro zapojení výchozího článku lze zjistit jednoduše poměrem vstupního napětí  $U_1$  a celkové impedance  $Z$ .

Z Obr. 3-2 jsou patrné impedance  $Z_1$ :

$$Z_1 = \frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_\mu}{R_{Fe} + j\omega L_\mu} \quad (3.1.1)$$

a  $Z_2$

$$Z_2 = R_1 + j\omega L_{\sigma 1} + j\omega L'_{\sigma 20} + \frac{R'}{s}, \quad (3.1.2)$$

kde  $L'_{\sigma 20}$  je rozptylová indukčnost rotorového vinutí.

Satorový proud v závislosti na skluzu je tedy:

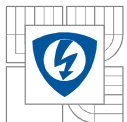
$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}}, \quad (3.1.3)$$

po dosazení a úpravě (Příloha P-1) jeho absolutní hodnota:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} + \frac{R'}{sR_{Fe}} + \frac{L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{L'_{\sigma 20}}{L_\mu}\right)^2 + \left(\frac{R_1}{\omega L_\mu} + \frac{R'}{s\omega L_\mu} - \frac{\omega L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \frac{\omega L'_{\sigma 20}}{R_{Fe}}\right)^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'}{s}\right)^2 + \left(-\frac{\omega L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \frac{\omega L'_{\sigma 20}}{R_{Fe}}\right)^2}} \quad (3.1.4)$$

### 3.1.2 Odvození momentu v závislosti na skluzu

Z Obr. 3-2 lze vidět, že hodnota proudu  $I'_2$  je rovna:



$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 20}')^2}}, \quad (3.1.5)$$

kde  $X_{\sigma 20}'$  je rozptylová reaktance rotorového vinutí při frekvenci  $f_1$  (frekvenci točivého magnetického pole). Jak ukazuje [6], z obvodového modelu je možné dále určit velikost výkonu  $P_{mech}$ :

$$P_{mech} = m \cdot \frac{R'}{s} (1 - s) \cdot I_2'^2, \quad (3.1.6)$$

kde  $m$  značí počet fází stroje. Vztah pro mechanický moment motoru je poté:

$$M_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega_m} \quad (3.1.7)$$

Mechanická úhlová rychlost rotoru je určena rozdílem uhlových rychlostí točivých polí statoru a rotoru:

$$\omega_m = \omega_1 - \omega_2 = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (3.1.8)$$

Hodnota momentu je poté určena podílem výkonu a úhlového kmitočtu, ze vztahu (3.1.6) dosadíme do (3.1.7) [6]:

$$M = \frac{P}{\omega_m} = \frac{P_{mech}}{\omega_m} \quad (3.1.9)$$

Při znalosti (3.1.5) je proto po dosazení a následném vyjádření získán vztah pro hodnotu elektrického výkonu:

$$P_{mech} = \frac{R'}{s} (1 - s) \cdot I_2'^2 = \frac{\frac{R'}{s} (1 - s) \cdot U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 20}')^2} \quad (3.1.10)$$

Výsledný vztah pro moment motoru s náhradním zapojením ve tvaru hybrid- $\Gamma$  v závislosti na skluzu je po dosazení [6]:

$$M = \frac{P_{mech}}{\omega_m} = \frac{\frac{R'}{s} (1 - s) \cdot U_1^2}{\omega_1 \cdot (1 - s) \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 20}')^2\right]}, \quad (3.1.11)$$

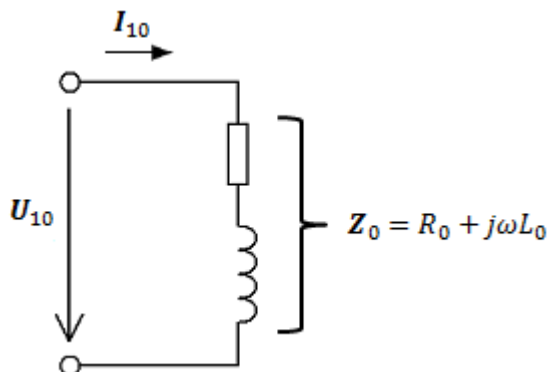
a po úpravě:

$$M = \frac{3 \cdot \frac{R'}{s} \cdot U_1^2}{\omega_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 20}')^2\right]} \quad (3.1.12)$$

Při pohledu na výsledný vztah je patrné, že změna napájecího napětí (zejména jeho pokles) výrazným způsobem ovlivní hodnotu momentu.

### 3.1.3 Stanovení parametrů z měření naprázdno

V této práci budou parametry příčné větve u zapojení ve tvaru výchozího článku z měření naprázdno určeny následujícím způsobem:

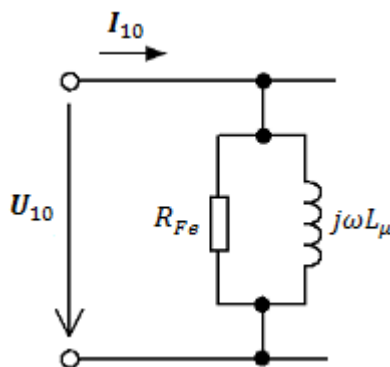


Obr. 3-3: Celková impedance při měření naprázdno

Z měření naprázdno je zjištěna reálná a komplexní část impedance (Obr. 3-3):

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (3.1.13)$$

Při měření bude uplatněna vždy konkrétní část obvodu dle typu náhradního zapojení. V případě náhradního zapojení výchozího článku se jedná o část, kterou ukazuje Obr. 3-3, tedy pouze o příčnou větev.



Obr. 3-4: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru výchozího článku

Z Obr. 3-4 vyplývá celková hodnota impedance při měření naprázdno:

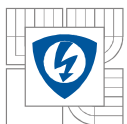
$$Z_{hr} = \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_\mu}}, \quad (3.1.14)$$

po úpravě na admitanci:

$$Y_{hr} = \frac{1}{R_{Fe}} - j \frac{1}{\omega L_\mu} \quad (3.1.15)$$

je známa reálná a imaginární část admitance při měření naprázdno pro výchozí článek.

Admitance při měření naprázdno jsou si vzájemně rovny:



$$\frac{1}{Z_0} = Y_{hr} \quad (3.1.16)$$

Dle (3.1.16) je admitance sériového obvodu při měření naprázdno:

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R_0 + j\omega L_0} \quad (3.1.17)$$

a po usměrnění zlomku:

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{R_0 - j\omega L_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} = \frac{R_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} - j \frac{\omega L_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} \quad (3.1.18)$$

Při platnosti (3.1.16) je tedy vidět, že srovnáním (3.1.15) a (3.1.18) je reálná část admitance:

$$\frac{R_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} = \frac{1}{R_{Fe}} \quad (3.1.19)$$

a imaginární část admitance:

$$\frac{\omega L_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} = \frac{1}{\omega L_\mu} \quad (3.1.20)$$

Výsledkem jsou vztahy pro výpočet parametrů příčné větve náhradního zapojení jedné fáze asynchronního motoru ve tvaru výchozího článku:

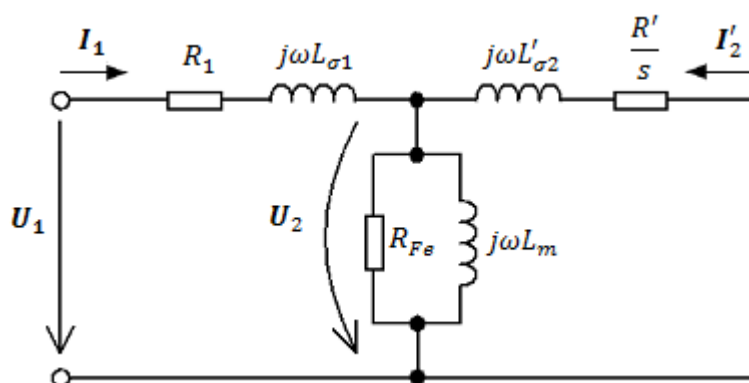
$$R_{Fe} = \frac{R_0^2 + (\omega L_0)^2}{R_0}, \quad (3.1.21)$$

$$L_\mu = \frac{R_0^2 + (\omega L_0)^2}{\omega^2 L_0} \quad (3.1.22)$$

### 3.2 Zapojení ve tvaru T-článku

Jak již bylo řečeno v kapitole 2, v literaturách se jako přesné náhradní schéma asynchronního motoru uvádí nejčastěji zapojení ve tvaru T-článku. V [3] je dokázáno, že tohle zapojení je v porovnání s  $\Gamma$ -článkem i T-článkem složitější. Objevují se zde dvě rozptylové indukčnosti, z nichž jedna je nadbytečná.

Samotné náhradní zapojení v tomto tvaru je pro praktické využití poměrně značně složité a navíc i zbytečné, jeho přesnost je totožná s ostatními články.



Obr. 3-5: Upravené náhradní zapojení jedné fáze ASM tvaru T-článku

Porovnáním Obr. 2-1 a Obr. 3-5 je vidět, že:

$$X_{\sigma 1} = j\omega L_{\sigma 1} \quad (3.2.1)$$

$$X'_{\sigma 2} = j\omega L'_{\sigma 2} \quad (3.2.2)$$

$$X_{\mu} = j\omega L_{\mu} \quad (3.2.3)$$

$$R' + \frac{R'}{s}(1-s) = \frac{R'}{s} \quad (3.2.4)$$

### 3.2.1 Odvození závislosti satorového proudu na skluzu

Pro stanovení závislosti satorového proudu asynchronního motoru na skluzu (tzv. proudové charakteristiky) je potřeba nejdříve určit hodnotu impedancí jednotlivých větví.

Při pohledu na náhradní zapojení ve tvaru T-článku je patrné, že impedance příčné větve  $Z_2$  bude:

$$Z_2 = \frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_{\mu}}{R_{Fe} + j\omega L_{\mu}}, \quad (3.2.5)$$

impedance podélné větve je pak rozdělena na dvě části:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_{\sigma 1}, \quad (3.2.6)$$

a

$$Z_3 = \frac{R'}{s} + j\omega L'_{\sigma 2} \quad (3.2.7)$$

Závislost je získána poměrem vstupního napětí a impedance obvodu:

$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1} \quad (3.2.8)$$

Konečné určení proudové charakteristiky pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku představuje rovnice (3.2.9), naznačený postup při odvození je možno vidět v Příloze P-2:

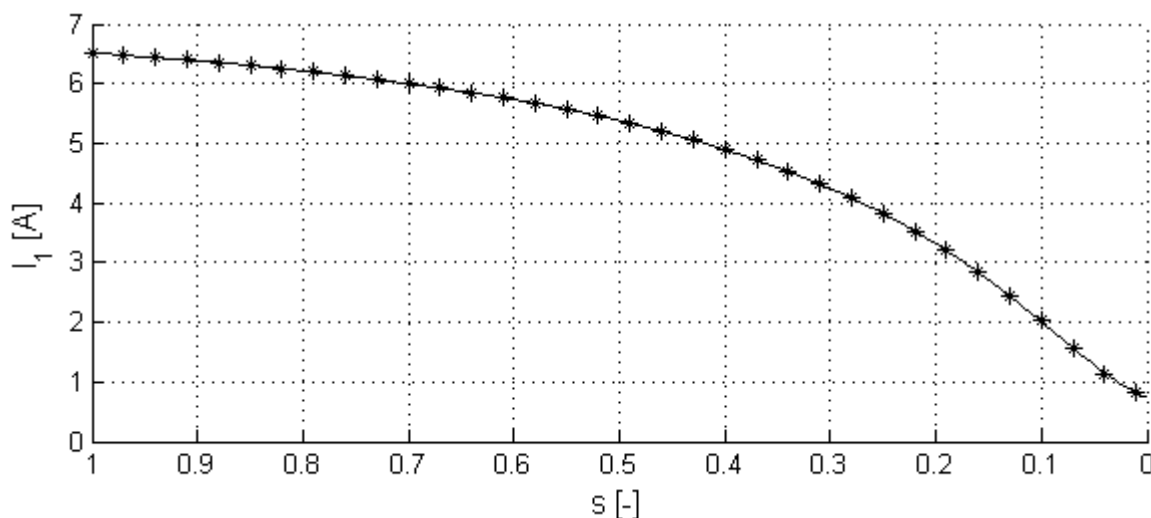
$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(s + s \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R'}{R_{Fe}}\right)^2 + \left(\frac{R'}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2}}{\sqrt{\alpha_7 + \alpha_8}}, \quad (3.2.9)$$

koeficienty  $\alpha_7$  a  $\alpha_8$  vyjadřují:

$$\alpha_7 = \left(R' + sR_1 + s \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2$$

$$\alpha_8 = \left(\frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} - s \frac{\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{L_\mu} - \frac{\omega R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - s \omega L'_{\sigma 2} - s \omega L_{\sigma 1}\right)^2$$

Průběh odvozené závislosti satorového proudu na skluzu je vidět na Obr. 3-6.



Obr. 3-6: Závislost satorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku

### 3.2.2 Odvození momentu v závislosti na skluzu

Nyní je při znalosti impedancí možné začít odvozovat závislost momentu na skluzu. Ta se určí ze vztahu:

$$M = \frac{P_{mech}}{\omega_{mech}} = \frac{\frac{R'}{s} \cdot I_2'^2}{\omega_1} \quad (3.2.10)$$

Proud  $I_2'$  je rotorový proud přepočtený na stranu satoru. Z Obr. 3-5 jednoznačně vyplývá, že jeho komplexní hodnota je určena napětím  $U_2$  a impedancí  $Z_3$ :

$$I_2' = \frac{U_2}{Z_3} \quad (3.2.11)$$

a konečně napětí  $U_2$ , jehož hodnota je pro výpočet závislosti potřebná, lze z Obr. 3-5 stanovit následovně:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}}{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1} \quad (3.2.12)$$

Po následných úpravách (viz. Příloha P-3) je tedy získána závislost momentu asynchronního motoru na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku:

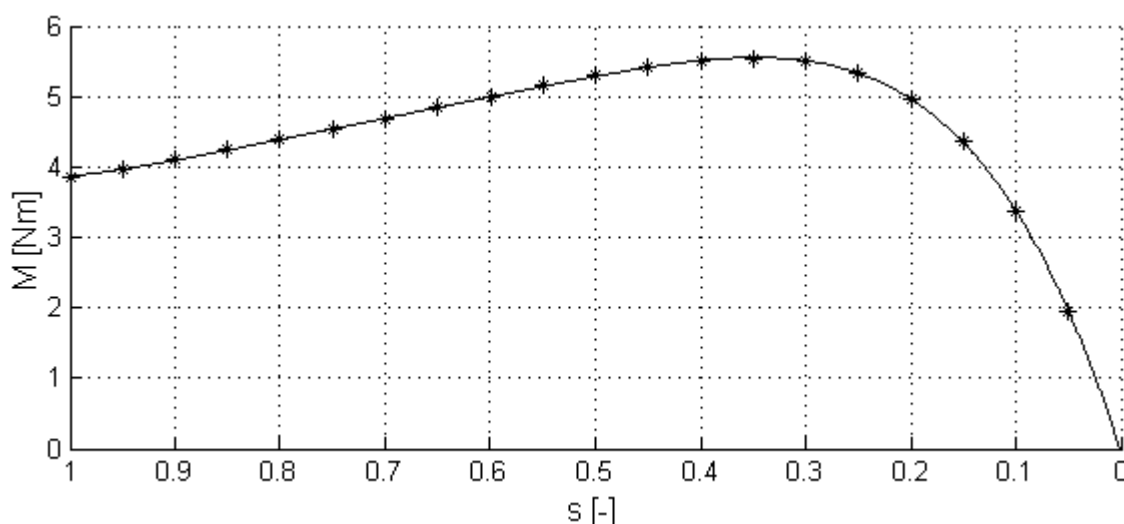
$$M = \frac{3U_1^2 \cdot \left( \frac{R'}{\omega L'_{\sigma 2}} + s \right)^2 \cdot \frac{R'}{s}}{\omega_1 \cdot (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2)}, \quad (3.2.13)$$

kde koeficienty  $\alpha_{11}$  a  $\alpha_{12}$  představují:

$$\alpha_{11} = \left[ (-s\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} - R' L_{\sigma 1}) \left( \frac{1}{L_{\sigma 1}} + \frac{R_1}{R_{Fe} L_{\sigma 1}} + \frac{1}{L'_{\sigma 2}} + \frac{1}{L_{\mu}} + \frac{R'}{s R_{Fe} L'_{\sigma 2}} \right) + \frac{R' R_1}{\omega L_{\mu}} + \frac{R'^2 R_1}{s \omega^2 L_{\mu} L'_{\sigma 2}} \right]$$

$$\alpha_{12} = \left[ \left( -R_1 - \frac{R' R_1}{s \omega L'_{\sigma 2}} \right) \left( \frac{R'}{R_1} + s + \frac{s L'_{\sigma 2}}{L_{\mu}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{R_1 L_{\mu}} + \frac{R'}{R_{Fe}} \right) + \frac{s \omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{\omega L_{\sigma 1} R'}{R_{Fe}} \right]$$

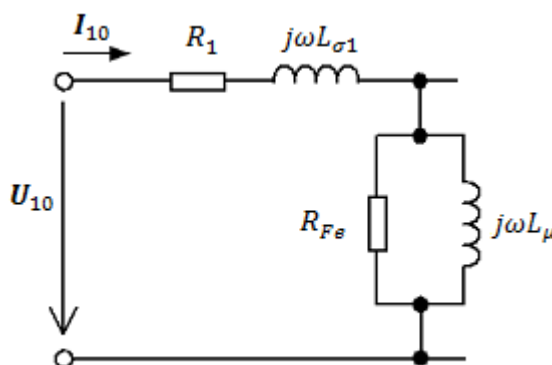
Průběh odvozené závislosti momentu na skluzu je zobrazen na Obr. 3-7.



Obr. 3-7: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku

### 3.2.3 Stanovení parametrů z měření naprázdno

Při srovnání s kapitolou 3.1.3 vyplývá, že reálná část impedance naprázdno bude větší o odpor vstupního vinutí  $R_l$  a imaginární část o rozptylovou indukčnost statorového vinutí  $L_{\sigma l}$  (viz. Obr. 3.8). Tato změna je při výpočtu dále uvažována.



Obr. 3-8: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení v tvaru T-článku

Podle vztahu (3.1.13) bude tedy impedance naprázdno:

$$Z_T = R_1 + j\omega L_{\sigma 1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}} \quad (3.2.14)$$

Reálná část impedance zapojení je ve srovnání s (3.1.14) tedy rozšířena o odpor  $R_1$  a rozptylovou indukčnost  $L_{\sigma 1}$ . Při platnosti:

$$Z_0 = Z_T \quad (3.2.15)$$

je poté výraz upraven na:

$$(R_0 - R_1) + j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1}) = \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}} \quad (3.2.16)$$

Převedením impedancí v (3.2.16) na admitance:

$$\frac{1}{(R_0 - R_1) + j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})} = \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}} \quad (3.2.17)$$

je poté v (3.2.17) stejným způsobem jako v (3.1.18) provedeno usměrnění zlomku na levé straně rovnice:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(R_0 - R_1) + j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})} \cdot \frac{(R_0 - R_1) - j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})}{(R_0 - R_1) - j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})} \\ = \frac{(R_0 - R_1) - j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2} \end{aligned} \quad (3.2.18)$$

Úpravou zlomku je opět získána reálná a imaginární část:

$$\frac{(R_0 - R_1)}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2} - j \frac{(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2}, \quad (3.2.19)$$

Díky kterým získáme stejně jako v (3.1.19) a (3.1.20) vztahy pro výpočet odporu  $R_{Fe}$ :

$$R_{Fe} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2}{(R_0 - R_1)} \quad (3.2.20)$$

a indukčnosti  $L_{\mu}$ :



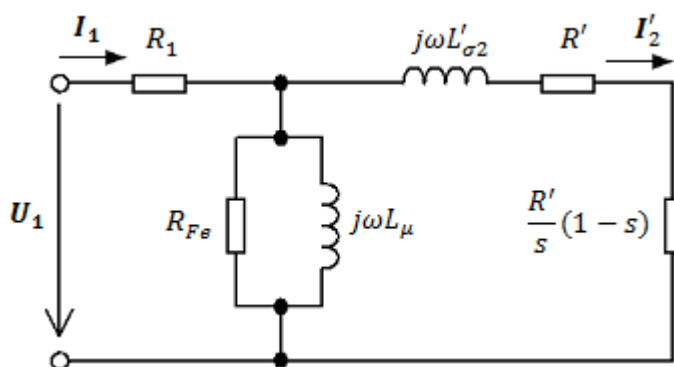
$$L_{\mu} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2}{\omega^2 (L_0 - L_{\sigma 1})} \quad (3.2.21)$$

### 3.3 Zapojení ve tvaru $\Gamma$ -článku

Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru  $\Gamma$ -článku je obecně považováno za zjednodušující a méně přesné než náhradní zapojení ve tvaru T-článku. V [3] je provedeno přesné odvození náhradního zapojení transformátoru ve tvaru T-článku,  $\Gamma$ -článku a  $\Pi$ -článku. Odvození je sice provedeno pro transformátor, je však možné ho užít i pro náhradní zapojení jedné fáze asynchronního motoru.

Rozdíl mezi náhradními zapojeními T-článku a  $\Gamma$ -článku spočívá v chybějící satorové rozptylové indukčnosti u  $\Gamma$ -článku. To ovšem neznamená, že se rozptyl ve satorovém vinutí neobjevuje. Naopak je v [3] dokázáno, že ze dvou rozptylových indukčností v náhradním zapojení ve tvaru T-článku je jedna nadbytečná [7].

Náhradní zapojení jedné fáze asynchronního motoru ve tvaru  $\Gamma$ -článku je znázorněno na Obr. 3-9.



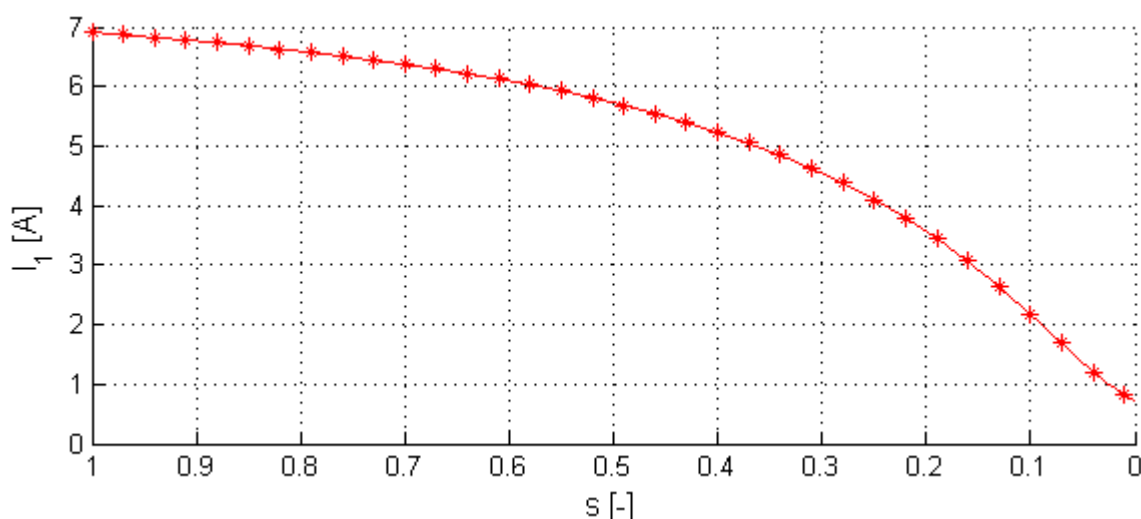
Obr. 3-9: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru  $\Gamma$ -článku

#### 3.3.1 Odvození závislosti satorového proudu na skluzu

Protože pro zapojení ve tvaru T-článku byla v kapitole 3.2.1 proudová charakteristika již odvozena, je její stanovení pro  $\Gamma$ -článek velmi jednoduchou záležitostí. Jak již bylo řečeno, jedna ze dvou rozptylových reaktancí je v T-článku nadbytečná. Ve vztahu (3.2.9) zanedbána rozptylová indukčnost satoru  $L_{\sigma 1}$ , výsledkem je tvar proudové charakteristiky pro náhradní zapojení ve tvaru  $\Gamma$ -článku. Je třeba poznamenat, že parametry jednotlivých zapojení nejsou ekvivalentní, tj. rozptylová indukčnost  $L'_{\sigma 2}$  T-článku není shodná s  $L'_{\sigma 2}$   $\Gamma$ -článku.

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(s + s \frac{L'_{\sigma 2}}{L_{\mu}} + \frac{R'}{R_{Fe}}\right)^2 + \left(\frac{R'}{\omega L_{\mu}} - s \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2}}{\sqrt{\left(R' + sR_1 + s \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{L_{\mu}} + \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + \frac{R' R_1}{\omega L_{\mu}}\right)^2 + \left(\frac{R' R_1}{\omega L_{\mu}} - s \frac{\omega R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} - s \omega L'_{\sigma 2}\right)^2}} \quad (3.3.1)$$

Průběh závislosti satorového proudu na skluzu lze vidět na Obr. 3-10.



Obr. 3-10: Závislost satorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru  $\Gamma$ -čláčku

### 3.3.2 Odvození momentu v závislosti na skluzu

Obdobným způsobem je postupováno i v případě odvození závislosti momentu na skluzu pro  $\Gamma$ -článek. Z rovnice závislosti momentu na skluzu pro T-článek odvozené v kapitole 3.2.2 je opět zanedbána rozptylová indukčnost satorového vinutí  $L_{\sigma 1}$ . Tím je získán vztah, vyjadřující závislost momentu na skluzu  $\Gamma$ -čláčku:

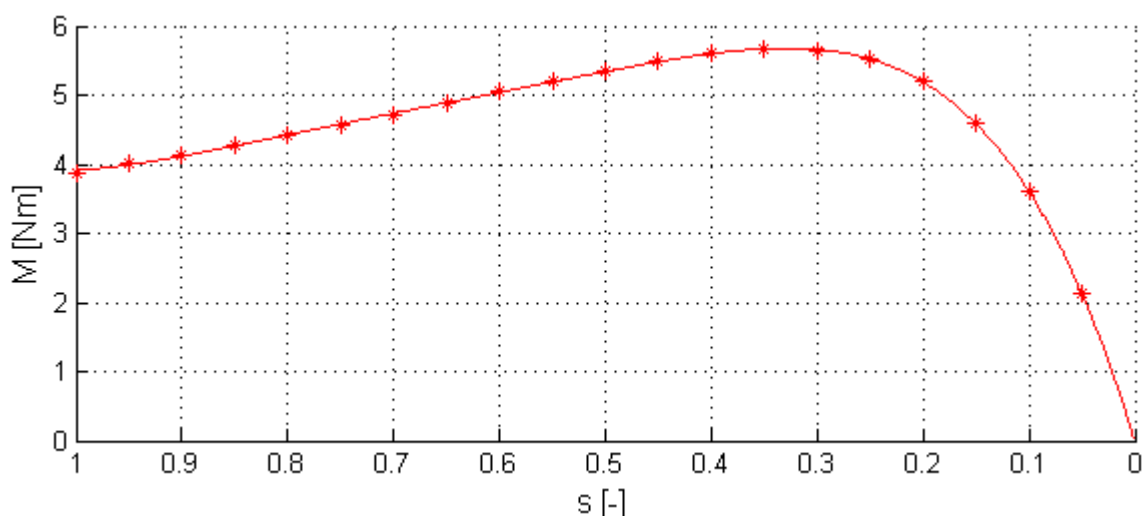
$$M = \frac{3U_1^2 \cdot \left[ \left( \frac{R'}{\omega L'_{\sigma 2}} \right)^2 + s^2 \right] \cdot \frac{R'}{s}}{\omega_1 \cdot (\alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2)}, \quad (3.3.2)$$

kde  $\alpha_{21}$  a  $\alpha_{22}$  jsou:

$$\alpha_{21} = \left( -s\omega L'_{\sigma 2} - \frac{s\omega R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{R' R_1}{\omega R_{Fe} L_{\mu}} + \frac{R'^2}{s\omega L'_{\sigma 2}} + \frac{R' R_1}{\omega L_{\mu}} + \frac{R' R_1}{\omega L'_{\sigma 2}} \right)$$

$$\alpha_{22} = \left( -2R' - sR_1 - \frac{sR_1 L'_{\sigma 2}}{L_{\mu}} - \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + \frac{R_1 R'^2}{s\omega^2 R_{Fe} L_{\mu} L'_{\sigma 2}} \right)$$

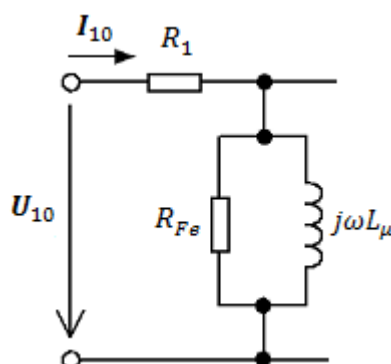
Průběh odvozené závislosti momentu na skluzu ukazuje Obr. 3-11. Oba průběhy jsou prakticky shodné, což potvrzuje, že jednotlivá zapojení jsou vzájemně ekvivalentní.



Obr. 3-11: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru  $\Gamma$ -článku

### 3.3.3 Stanovení parametrů z měření naprázdno

Při srovnání s kapitolou 3.1.3 vyplývá, že reálná část impedance naprázdno bude větší o odpor vstupního vinutí  $R_1$  (viz. Obr. 3.12). Tento odpor je při výpočtu dále uvažován.



Obr. 3-12: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení v tvaru  $\Gamma$ -článku

Stejným způsobem jako v předchozích případech bude tedy impedance naprázdno:

$$Z_{\Gamma} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}} \quad (3.3.3)$$

Reálná část impedance zapojení je v porovnání s (3.1.14) tedy rozšířena o odpor  $R_1$ . Při platnosti:

$$Z_0 = Z_{\Gamma} \quad (3.3.4)$$

je tedy výraz upraven:

$$R_0 - R_1 + j\omega L_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}} \quad (3.3.5)$$

Převedením impedancí v (3.3.5) na admitance:

$$\frac{1}{(R_0 - R_1) + j\omega L_0} = \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}} \quad (3.3.6)$$

je poté v (3.3.6) stejným způsobem jako v (3.1.18) provedeno usměrnění zlomku na levé straně rovnice:

$$\frac{1}{(R_0 - R_1) + j\omega L_0} \cdot \frac{(R_0 - R_1) - j\omega L_0}{(R_0 - R_1) - j\omega L_0} = \frac{(R_0 - R_1) - j\omega L_0}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2} \quad (3.3.7)$$

Úpravou zlomku je opět získána reálná a imaginární část:

$$\frac{(R_0 - R_1)}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2} - j \frac{\omega L_0}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}, \quad (3.3.8)$$

Díky kterým získáme stejně jako v (3.1.19) a (3.1.20) vztahy pro výpočet odporu  $R_{Fe}$ :

$$R_{Fe} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}{(R_0 - R_1)} \quad (3.3.9)$$

a indukčnosti  $L_\mu$ :

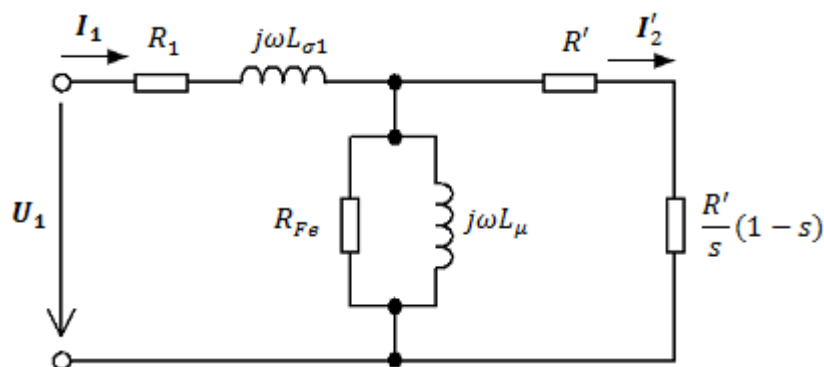
$$L_\mu = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}{\omega^2 L_0} \quad (3.3.10)$$

### 3.4 Zapojení ve tvaru T-článku

Náhradní zapojení v tomto tvaru je vhodné použít v případě, že je asynchronní motor napájen zdrojem proudu [3].

T-článek představuje opět jisté zjednodušení. Ve srovnání s T-článkem se zde objevuje znovu pouze jedna rozptylová indukčnost, v tomto případě satorová  $L_{\sigma 1}$ .

Schéma náhradního zapojení jedné fáze asynchronního motoru ve tvaru T-článku je znázorněno na Obr. 3-13:



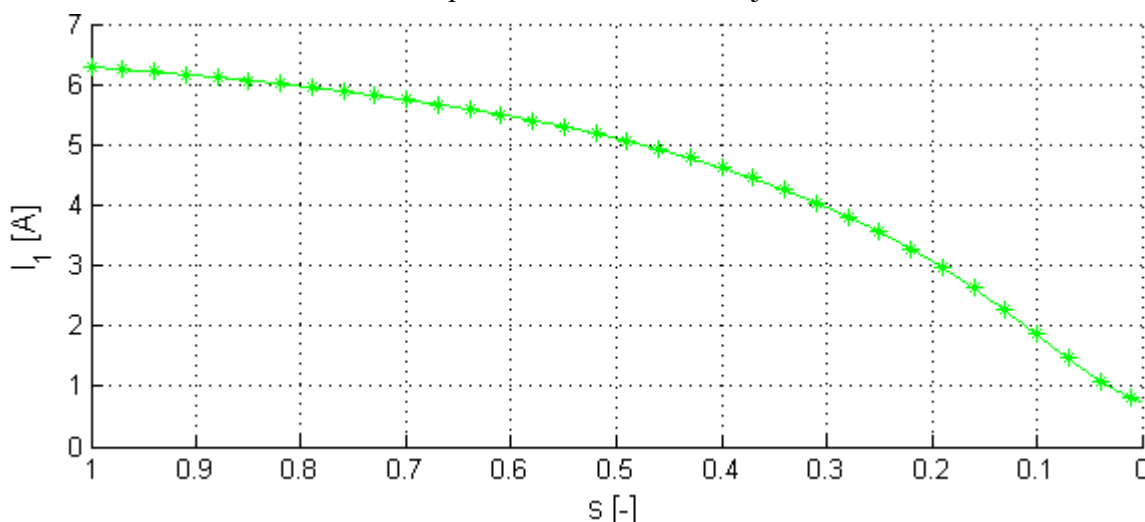
Obr. 3-13: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru T-článku

#### 3.4.1 Odvození závislosti satorového proudu na skluzu

Stejným způsobem jako v předchozích bodech je provedeno odvození (Příloha P-4) závislosti satorového proudu  $I_1$  na skluzu  $s$  i v případě T-článku, a to absolutní hodnotou podílu vstupního napětí  $U_1$  a celkové impedance obvodu  $Z$ . Výslednou proudovou charakteristiku představuje rovnice (3.4.1):

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(s + \frac{R'}{R_{Fe}}\right)^2 + \left(\frac{R'}{\omega L_\mu}\right)^2}}{\sqrt{\left(R + sR_1 + \frac{R_1 R'}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{R_1 R'}{\omega L_\mu}\right)^2 + \left(\frac{R_1 R'}{\omega L_\mu} - s\omega L_{\sigma 1} - \frac{\omega R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}}\right)^2}} \quad (3.4.1)$$

Odvozenou závislost satorového proudu na skluzu ukazuje Obr. 3-14.



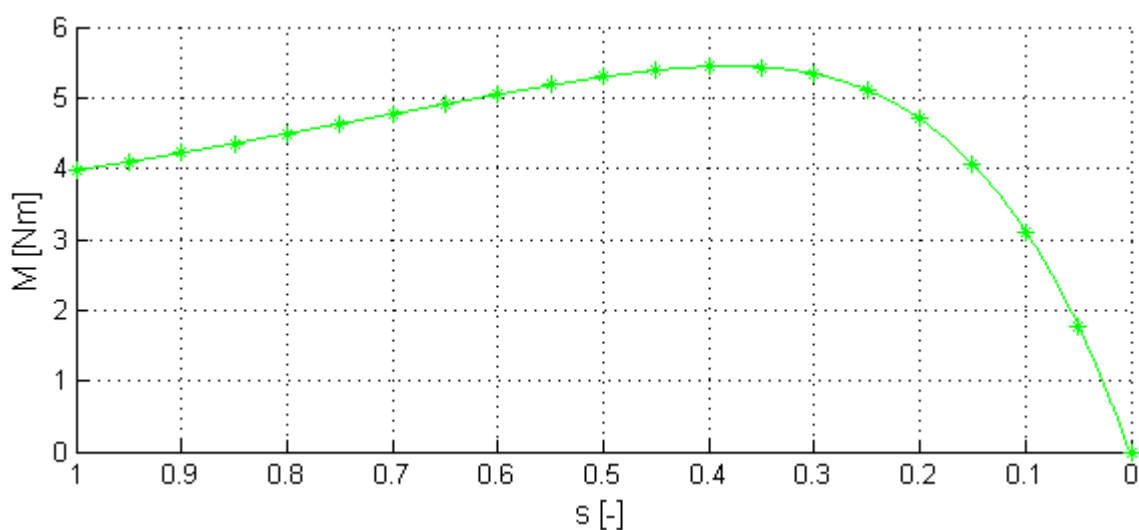
Obr. 3-14: Závislost satorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku

### 3.4.2 Odvození momentu v závislosti na skluzu

Obdobě jako v případě  $\Gamma$ -článku, je i v případě náhradního zapojení ve tvaru T-článku pouze jedna rozptylová indukčnost. Rozdíl zde spočívá v zanedbání rozptylové indukčnosti rotoru  $L'_{\sigma 2}$ .

Odvození momentu pro T-článek (Příloha P-5) je tedy zjednodušeno prohlášením rozptylové indukčnosti rotoru přepočtené na stator  $L'_{\sigma 2}$  za nulovou. Výsledný moment v závislosti na skluzu pak ukazuje (3.4.2), průběh odvozené závislosti je možno vidět na Obr. 3-15.

$$M = \frac{3U_1^2 \cdot R'^3 \cdot s}{\omega_1 \cdot \left[ \left( sR'R_1 + R'^2 + \frac{R'^2 R_1}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} \right)^2 + \left( \frac{R_1 R'}{\omega L_\mu} - s\omega R' L_{\sigma 1} - \frac{\omega L_{\sigma 1} R'^2}{R_{Fe}} \right)^2 \right]} \quad (3.4.2)$$



Obr. 3-15: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku

### 3.4.3 Stanovení parametrů z měření naprázdno

V případě náhradního zapojení ve tvaru T-článku je schématická část obvodu uplatňovaná při měření totožná s T-článkem, výsledné vztahy pro výpočet parametrů jsou proto rovněž shodné. Pro odpor  $R_{Fe}$  platí vztah (3.2.20), pro magnetizační indukčnost  $L_\mu$  pak (3.2.21).

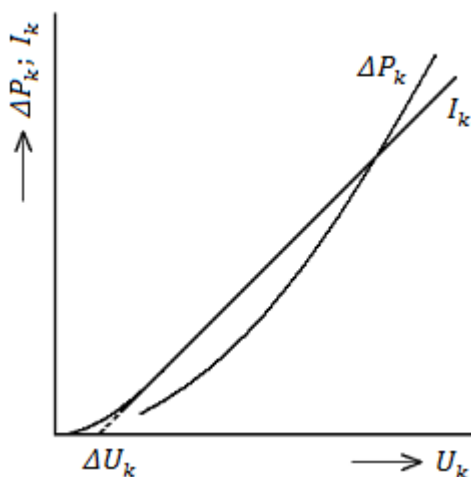
## 4 ZKOUŠENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ

U asynchronních motorů existují tři provozní stavy. Jedná se o chod naprázdno, chod nakrátko a chod při zatížení.

Měření prováděná při těchto provozních stavech poskytují potřebné údaje, díky kterým je možné analyzovat parametry asynchronních motorů.

### 4.1 Zkouška nakrátko

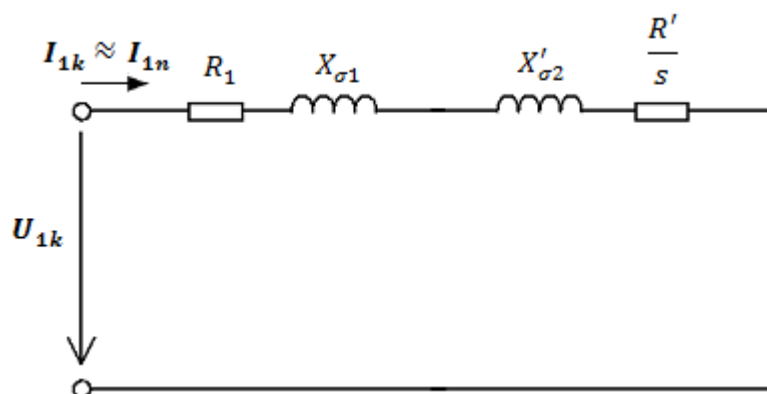
Při zkoušce nakrátko je měřený stroj, resp. jeho rotor, zabrzděn a jeho stator je napájen sníženým napětím za tím účelem, aby odebíral stroj postupně ze sítě proud přibližně  $1,5I_n$ ;  $I_n$  a  $0,5I_n$ . Současně při tom jsou zjišťovány ztráty v chodu nakrátko  $\Delta P_k$ . Dále jsou měřeny hodnoty napětí  $U_{1k}$ , proudu nakrátko  $I_{1k}$ , elektrického příkonu  $P_{1k}$ , odporu vstupního vinutí  $R_l$  a celkové rozptylové reaktance  $X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}$ . Při měření se motor značně zahřívá, je proto potřeba, aby měření proběhlo v co nejkratší době (po odečtení hodnot z měřicích přístrojů motor vypnout a počkat na jeho ochlazení a poté opět pokračovat v měření). Z hodnot  $\Delta P_k$ ,  $U_k$  a  $I_k$  získaných měřením jsou poté sestaveny charakteristiky nakrátko podle Obr. 4-1 [2].



Obr. 4-1: Charakteristiky nakrátko asynchronního motoru [2]

V rámci měření nakrátko (tj. při zabrzděném rotoru) se motor netočí, hodnota otáček je proto nulová a tedy velikost skluzu je rovna jedné. Asynchronní motor je při měření ve stavu spouštění, lze proto z jeho výsledků zjistit hodnoty, které jsou pro spouštění typické, tj. záběrný proud a záběrný moment [2].

V konečné velikosti impedance nakrátko  $Z_{1k}$  se hlavní magnetizační reaktance  $X_\mu$  ani odpor reprezentující ztráty v železe  $R_{Fe}$  neprojeví. Celá příčná větev náhradního zapojení tedy není při tomto měření uplatněna, jak ukazuje Obr. 4-2.



Obr. 4-2: Náhradní schéma asynchronního motoru při měření nakrátko

Samotným cílem zkoušky nakrátko je stanovit velikost ztrát nakrátko  $\Delta P_k$  a zjistit hodnoty rozptylové indukčnosti statoru a rotoru a odporů statorového a rotorového vinutí.

Při zkoušce při plném napětí je záběrný proud, který motor vyvine při záběrném momentu, velikosti až sedmi násobku jmenovitého proudu  $I_n$  [2].

## 4.2 Zkouška naprázdno

Pro zjištění parametrů příčné větve  $R_{Fe}$  a  $X_\mu$  je konáno měření naprázdno. To je prováděno v motorickém chodu postupnou změnou statorového napětí  $U_I$  přibližně od  $1,2U_n$  do  $0,3U_n$ . Při této zkoušce je hodnota skluzu velmi malá (téměř rovna nule) a rotor motoru se otáčí bez zatížení (rychlostí velmi blízké synchronní). Měření probíhá při jmenovitém kmitočtu. Z výsledků zkoušky lze posuzovat kvalitu magnetického obvodu a mechanického provedení motoru.

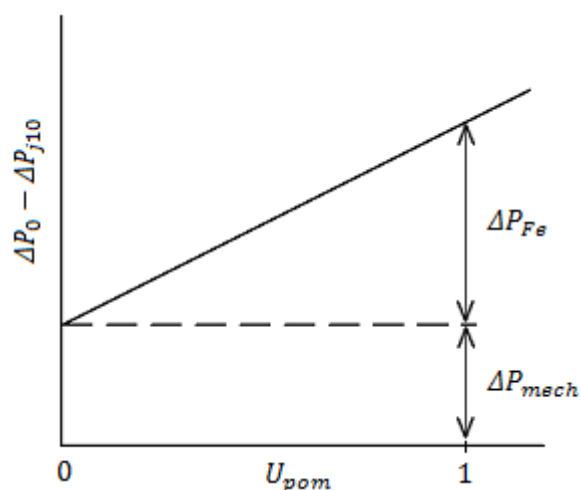
Měřenými veličinami jsou proudy naprázdno  $I_{I0}$  a napětí naprázdno  $U_{I0}$  ve všech fázích statoru, z nichž se určuje jejich střední hodnota. Proud naprázdno se skládá z činné a jalové složky, kdy činná složka hradí ztráty naprázdno a jalová složka budí magnetické pole. Poměr mezi činnou a jalovou složkou roste s růstem napětí.

Dále je měřen příkon naprázdno  $P_{I0}$  (přiváděný do vinutí statoru) a ztráty naprázdno  $\Delta P_0$ . Z naměřených hodnot je poté provedeno rozdělení ztrát. Po snížení celkových ztrát naprázdno  $\Delta P_0$  o Joulovy ztráty ve vinutí statoru  $\Delta P_{jI0}$  je možné zjistit hodnotu ztrát v železe  $\Delta P_{Fe}$  a mechanických ztrát  $\Delta P_{mech}$ , jak lze vidět na Obr. 4-3.

Rozdělení ztrát:

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = \Delta P_0 - 3 \cdot R_1 I_{I0}^2 \quad (4.2.1)$$





Obr. 4-3: Rozdělení ztrát v železe a ztrát mechanických

Napětí  $U_{pom}$  je poměrné napětí, resp. kvadrát poměru změřené hodnoty napětí  $U_{10}$  a jmenovité hodnoty  $U_n$ :

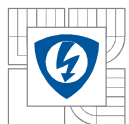
$$U_{pom} = \left( \frac{U_{10}}{U_n} \right)^2 \quad (4.2.2)$$

Mechanické ztráty  $\Delta P_{mech}$  jsou od ztrát v železe  $\Delta P_{Fe}$  odděleny extrapolací křivky ztrát  $\Delta P_0$  až na nulové napětí. Joulovy ztráty proudem naprázdno jsou u strojů větších výkonů (nad 5 kW) zanedbány [1], [2], [4].

### 4.3 Měření při zatížení

Zatěžovací charakteristiky asynchronního stroje je potřeba znát, aby bylo možno posoudit jeho vlastnosti (např. přetížitelnost) a vhodnost pro konkrétní provozní a pracovní podmínky. Na těchto charakteristikách jsou vyobrazeny závislosti hlavních provozních veličin motoru (otáčky, příkon, moment, statorový proud,  $\cos \varphi$ , účinnost a skluz) v závislosti na výkonu stroje.

Charakteristiky je možné sestavit po odměření odpovídajících veličin stroje. Uskutečnit tato měření na strojích velkých výkonů je ovšem značně složité a také cenově nákladné. Sestrojení zatěžovacích charakteristik je proto možné i pomocí tzv. kruhového diagramu, pro jehož konstrukci stačí výsledků výše zmíněných zkoušek naprázdno a nakrátko [1], [2].



## 5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V rámci praktického ověření parametrů stroje bylo provedeno měření na konkrétním asynchronním motoru AOM090L02-016 (štitkové parametry v Příloze P-5).

### 5.1 Zatěžovací charakteristika

Pro uvedený motor byla nejprve změřena zatěžovací charakteristika, jejíž veškeré naměřené a vypočtené parametry jsou uvedeny v Tab. 3.

Odpory vstupního vinutí za studena:

$$R_U \quad [\Omega] \quad 11,880$$

$$R_V \quad [\Omega] \quad 12,115$$

$$R_W \quad [\Omega] \quad 11,475$$

### 5.2 Zkouška naprázdno

Po odměření zatěžovací charakteristiky byla dále také provedena zkouška naprázdno. Naměřené a vypočtené hodnoty parametrů asynchronního motoru jsou uvedeny v Tab. 4.

Odpory vstupního vinutí:

$$R_U \quad [\Omega] \quad 12,920$$

$$R_V \quad [\Omega] \quad 13,190$$

$$R_W \quad [\Omega] \quad 12,435$$

Tab. 1: Výsledky zkoušky naprázdno motoru AOM090L02-016

$U_{I0}$ [V]	$I_{I0}$ [A]	$P_{I0}$ [W]	$R_{Fe}$ [ $\Omega$ ]	$X_\mu$ [ $\Omega$ ]	$L_\mu$ [H]
401,160	0,881	58,000	2774,815	263,961	0,619

### 5.3 Zkouška nakrátko

Při zkoušce nakrátko byly zjištěny parametry podélné větve. Měření bylo nutno provést v co nejkratším čase, protože dochází ke značnému zahřívání a tím mimo jiné k rychlému nárůstu odporu vstupního vinutí. Výsledek zkoušky ukazuje Tab. 5.

Odpory vstupního vinutí:

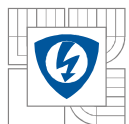
$$R_U \quad [\Omega] \quad 12,585$$

$$R_V \quad [\Omega] \quad 12,835$$

$$R_W \quad [\Omega] \quad 12,140$$

Tab. 2: Výsledky měření nakrátko pro motor AOM090L02-016

$U_{Ik}$ [V]	$I_{Ik}$ [A]	$P_{Ik}$ [W]	$X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}$ [ $\Omega$ ]	$L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}$ [H]	$R'$ [ $\Omega$ ]
81,277	1,302	116,920	27,759	0,088	10,376



## 6 VÝPOČTENÉ PARAMETRY

Ze vztahů odvozených v kapitolách 3.2.3 a 3.3.3 (náhradní zapojení ve tvaru T a  $\Gamma$ -článku) je z hodnot získaných měřením naprázdno proveden výpočet parametru  $R_{Fe}$  pro všechna tři zapojení.

Střední hodnota odporu vstupního vinutí:

$$R_1 \quad [\Omega] \quad 12,633$$

### 6.1 Výpočet parametrů $R_0$ a $\omega L_0$ pro stanovení příčné větve

Z měření naprázdno byly následujícími výpočty zjištěny reálné a imaginární části impedancí uplatněných částí obvodu (viz. Obr. 3.6).

Reálná část impedance  $Z_0$ :

$$R_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \cdot \cos\varphi_{10} \quad (6.1.1)$$

Imaginární část impedance  $Z_0$ :

$$\omega L_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \cdot \sin(\arccos \varphi_{10}) \quad (6.1.2)$$

Příklad výpočtu odporu a reaktance pro hodnotu napětí  $U_{10} = 401,160$  [V] uvádí následující vztahy.

Hodnota reálné části impedance:

$$R_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \cdot \cos\varphi_{10} = \frac{401,160}{\sqrt{3} \cdot 0,881} \cdot 0,095 = 24,885 \text{ } [\Omega] \quad (6.1.3)$$

Hodnota imaginární části impedance:

$$\omega L_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \cdot \sin(\arccos \varphi_{10}) = \frac{401,160}{\sqrt{3} \cdot 0,881} \cdot \sin(\arccos(0,095)) = 261,594 \text{ } [\Omega] \quad (6.1.4)$$

Následně byl dle vztahů specifických pro každé ze tří typů zapojení proveden výpočet odporu  $R_{Fe}$  a indukčnosti  $L_\mu$ . Hodnoty odporu  $R_{Fe}$  a indukčnosti  $L_\mu$  pro všechny velikosti napětí nastavované při měření naprázdno je možno vidět v Tab. 5, resp. v Tab. 6.

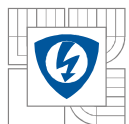
### 6.2 Výpočet parametrů pro T-článek

Výpočet parametrů příčné větve pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku je dle vztahů (3.2.20) a (3.2.21) následující:

Odpor reprezentující ztráty v železe:

$$R_{Fe} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594 - 13,880)^2}{(24,885 - 12,633)} = 5020,497 \text{ } [\Omega] \quad (6.2.1)$$

Hlavní magnetizační indukčnost:



$$L_{\mu} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594 - 13,880)^2}{(100\pi)^2(0,833 - 0,044)} = 0,790 [H] \quad (6.2.2)$$

### 6.3 Výpočet parametrů pro $\Gamma$ -článek

Obdobným způsobem je výpočet proveden také pro náhradní zapojení ve tvaru  $\Gamma$ -člátku. Ze znalosti vypočtených reálných a imaginárních částí impedance je parametr  $R_{Fe}$  dle (3.3.9) určen:

$$R_{Fe} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}{(R_0 - R_1)} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594)^2}{(24,885 - 12,633)} = 5597,448 [\Omega] \quad (6.3.1)$$

A parametr  $L_{\mu}$  dle (3.3.10) poté:

$$L_{\mu} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}{\omega^2 L_0} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594)^2}{(100\pi)^2 \cdot 0,833} = 0,835 [H] \quad (6.3.2)$$

Hodnoty vypočtených parametrů  $R_{Fe}$  a  $L_{\mu}$  pro všechna nastavovaná napětí při měření naprázdno ukazuje Tab. 5, resp. Tab. 6.

### 6.4 Výpočet parametrů pro $T$ -článek

Stejným způsobem jako v případě náhradního zapojení  $T$ -člátku jsou určeny parametry i pro  $T$ -článek, jelikož je při měření uplatňována stejná část schématu. Rozdíl spočívá pouze ve velikosti rozptylové reaktance, která je u  $T$ -člátku  $X_{\sigma 1} = 27,759 [\Omega]$ .

Odpor  $R_{Fe}$  je dle vztahu (3.2.20) tedy:

$$R_{Fe} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594 - 27,759)^2}{(24,885 - 12,633)} = 4474,991 [\Omega] \quad (6.3.1)$$

Hlavní magnetizační indukčnost dle (3.2.21) pak:

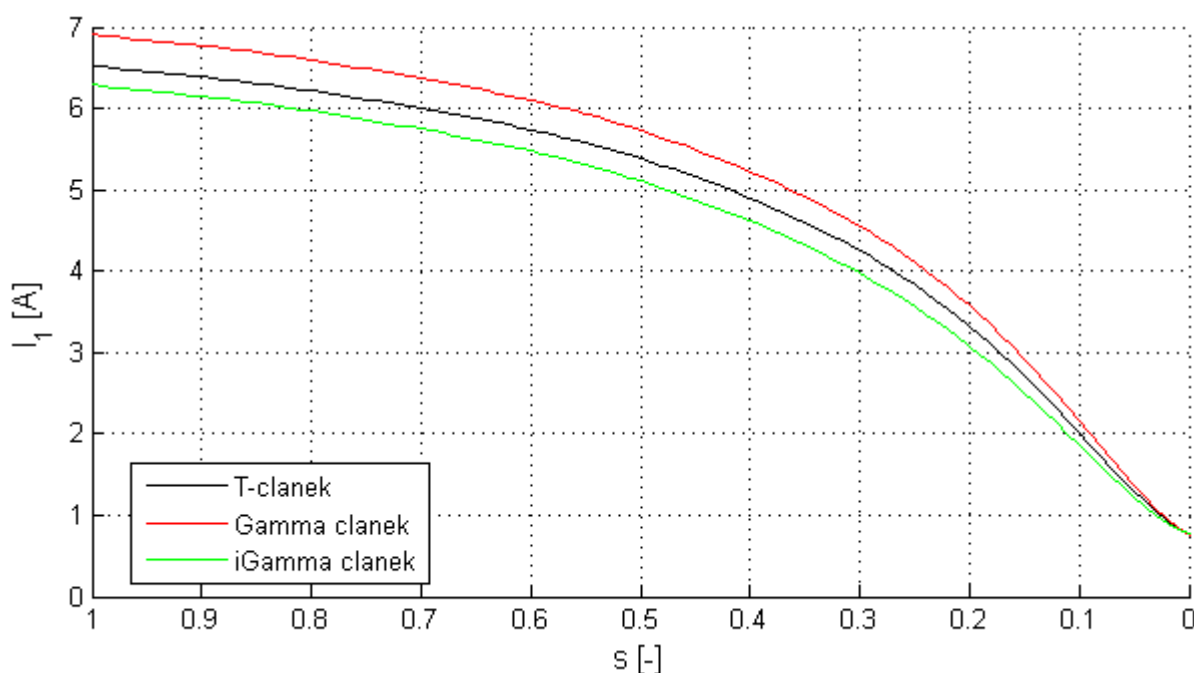
$$L_{\mu} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594 - 27,759)^2}{(100\pi)^2(0,833 - 0,088)} = 0,746 [H] \quad (6.3.2)$$

## 7 SROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK MOTORU

Při odvození vztahů pro jednotlivá zapojení byly také pomocí programu MATLAB provedeny simulace průběhů momentových a proudových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení. Při simulaci těchto průběhů byla respektována závislost parametrů příčné větve na napětí. Výsledky měření, včetně grafického zpracování závislosti prvků na napětí, je možné vidět v příloze.

### 7.1 Proudové charakteristiky pro jednotlivá náhradní zapojení

Srovnání vypočtených proudových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení ukazuje Obr. 7-1:



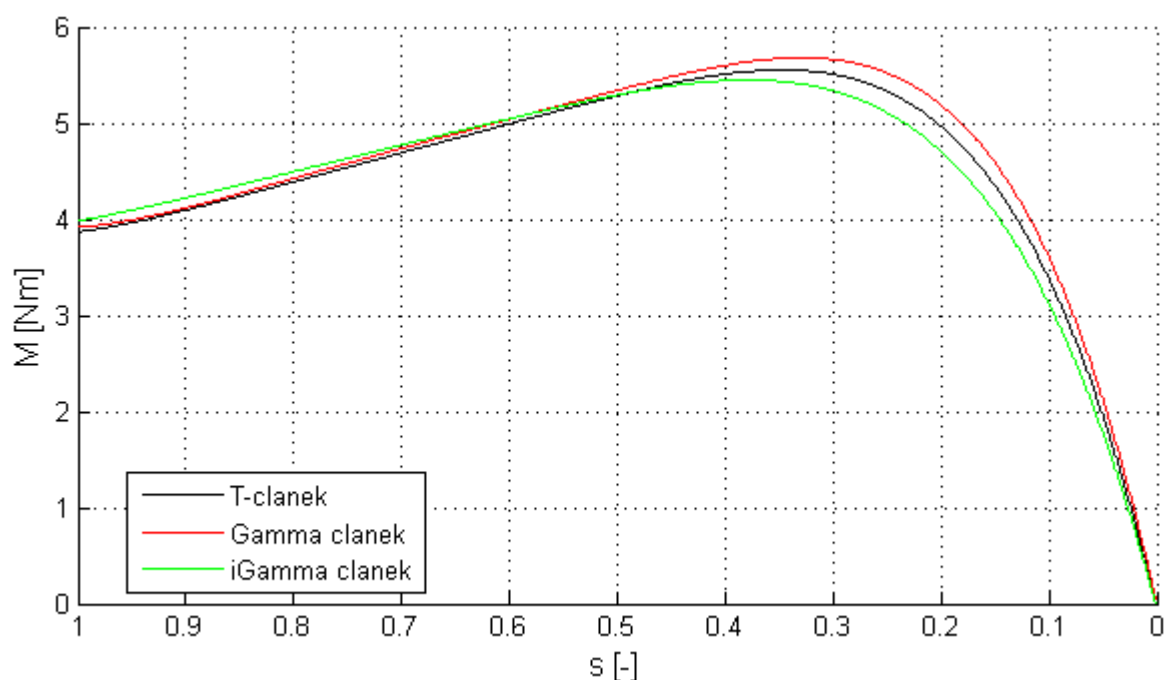
Obr. 7-1: Srovnání vypočtených proudových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení

Jak lze z průběhu grafické závislosti vidět, proudová charakteristika T,  $\Gamma$  i  $\Gamma$ -článku se příliš neliší a je proto možné považovat přepočet parametrů těchto zapojení za ekvivalentní.

Proudová i momentová charakteristika zapojení ve tvaru výchozího článku jsou v porovnání s ostatními zapojeními značně odlišné. Toto zapojení není vhodné užívat pro výpočty a simulace jako ekvivalentní náhradu, jeho jednoduchost je doprovázena značnou nepřesností.

### 7.2 Momentové charakteristiky pro jednotlivá náhradní zapojení

Srovnání vypočtených momentových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení přináší Obr. 7-2 níže.

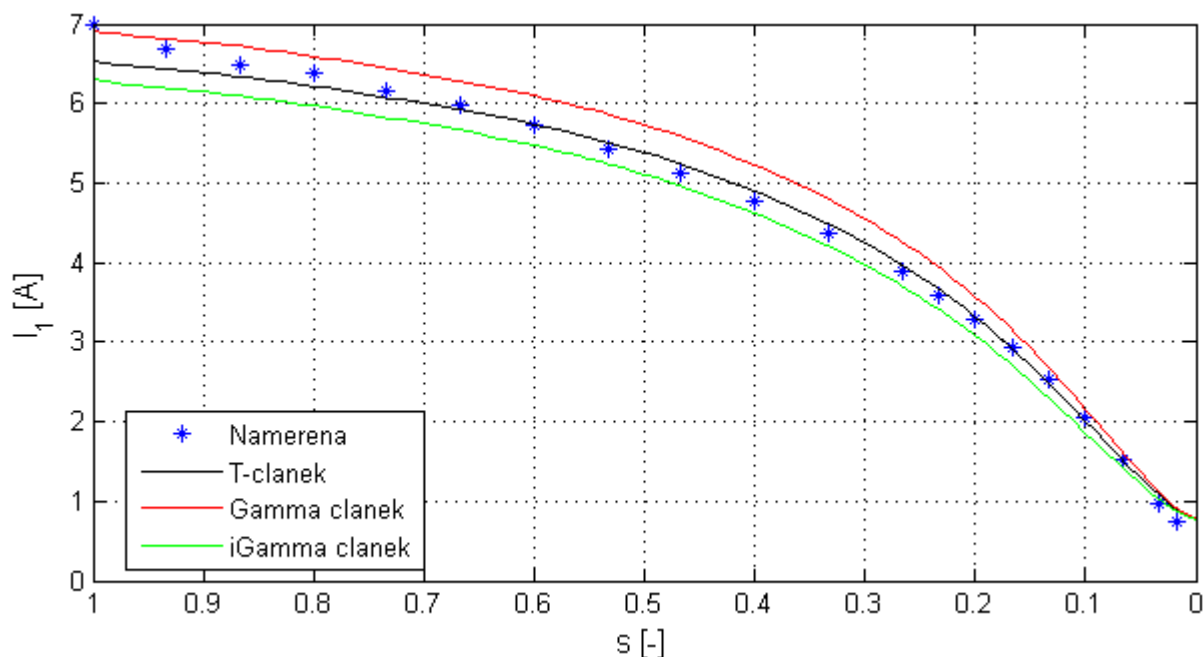


Obr. 7-2: Srovnání vypočtených momentových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení

Jak lze vidět, průběhy momentových charakteristik náhradních zapojení ve tvaru T,  $\Gamma$  a T-članku jsou si velmi podobné.

### 7.3 Naměřené zatěžovací charakteristiky v porovnání s vypočtenými

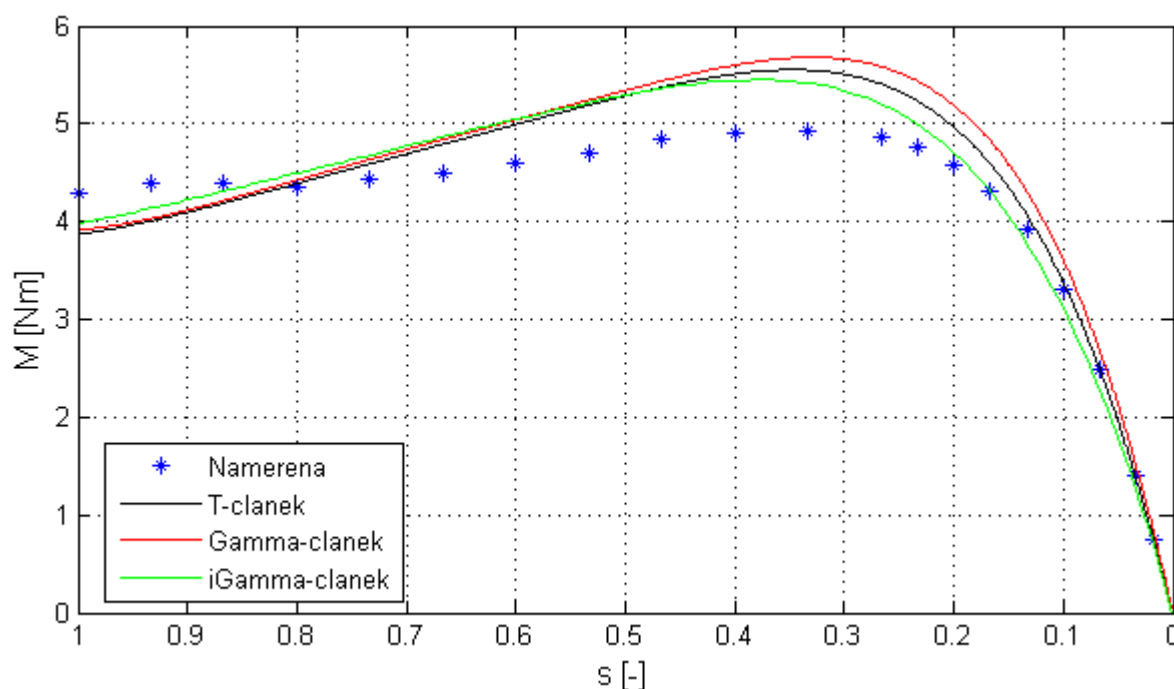
V rámci práce bylo provedeno měření zatěžovacích charakteristik motoru ATAS T22VT512 (7-0512) o jmenovitém výkonu 0,6 kW. Naměřenou proudovou charakteristiku lze vidět na Obr. 7-3:



Obr. 7-3: Srovnání naměřené proudové charakteristiky s vypočtenými

Z grafu vyplývá, že průběh naměřené proudové charakteristiky odpovídá simulacím, které byly zrealizovány pro jednotlivá náhradní zapojení. Měření bylo prováděno při sníženém napětí ( $U \approx 200 \text{ V}$ ) a hodnoty proudů byly poté přepočteny na jmenovité napětí.

Stejným způsobem byla sestrojena i momentová charakteristika, kdy výsledný vnitřní moment (naměřený moment na hřídeli zvětšený o moment tření) byl opět přepočten na jmenovité napětí. Výsledný průběh momentové charakteristiky a její srovnání s vypočtenými je na Obr. 7-4.

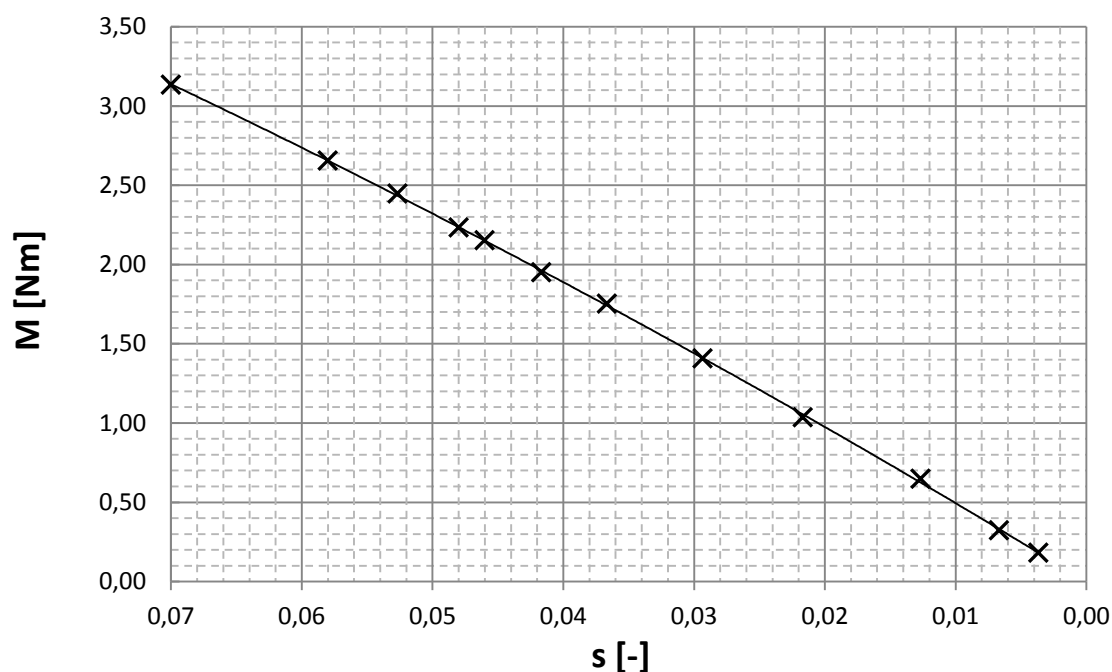


Obr. 7-4: Srovnání naměřené momentové charakteristiky s vypočtenými

Průběhy vypočtených charakteristik jsou naměřené charakteristice značně blízké. Rozdíl mezi změřeným průběhem a teoretickými spočívá například v proměnné hodnotě odporů vinutí, která se s teplotou (tj. dobou měření) mění, v důsledku toho se mimo jiné pozměňuje i pozice momentu zvratu, tj. jeho velikost a hodnota skluzu, při které moment zvratu nastává. Další chybou, mající vliv na přesnost charakteristiky, je vyjma teploty také chyba způsobená rozdílným sycením magnetického obvodu, která u měření při sníženém napětí nastává. V neposlední radě je příčinou rozdílů mezi charakteristikou naměřenou a vypočtenými také vliv vyšších harmonických, které se ve skutečném stroji vždy vyskytují, avšak při výpočtu je uvažována pouze první harmonická.

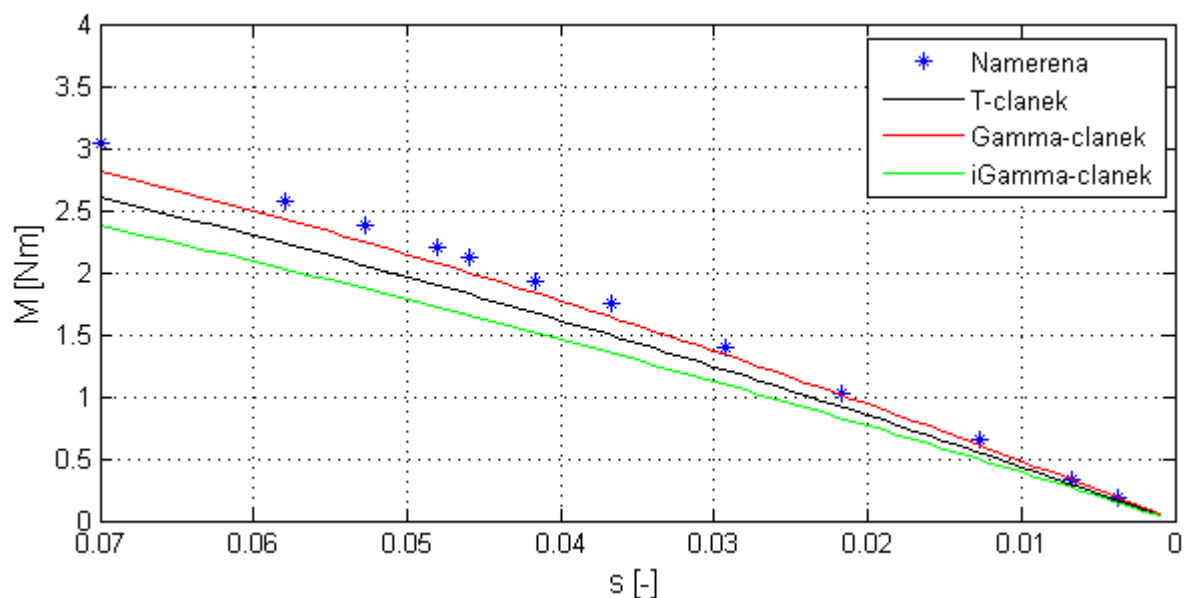
Momentu zvratu se u naměřené charakteristiky vyskytuje okolo skluzu  $s_{zv1} = 0,3$  a jeho hodnota je přibližně  $M_{zv1} = 5 \text{ Nm}$ . U vypočtených charakteristik se jeho velikost pohybuje v rozmezí přibližně 5,5 až 5,7  $\text{Nm}$  při skluzu  $s_{zv2} = 0,35$ . Záběrný moment pak má hodnotu asi  $M_{z1} = 4,3 \text{ Nm}$ , zatímco teoretická hodnota pro jednotlivá zapojení odpovídá hodnotě  $M_{z2} = 4 \text{ Nm}$ .

Pro pracovní oblast momentové charakteristiky použitého motoru bylo dále realizováno měření při jmenovitém napětí. V tomto případě se chyba způsobená rozdílným sycením, na rozdíl od měření při sníženém napětí, nevyskytuje a uplatněn je zde zejména vliv teploty motoru, resp. jeho vinutí. Výsledek měření pracovní oblasti představuje Obr. 7-5, resp. Obr. 7-6.



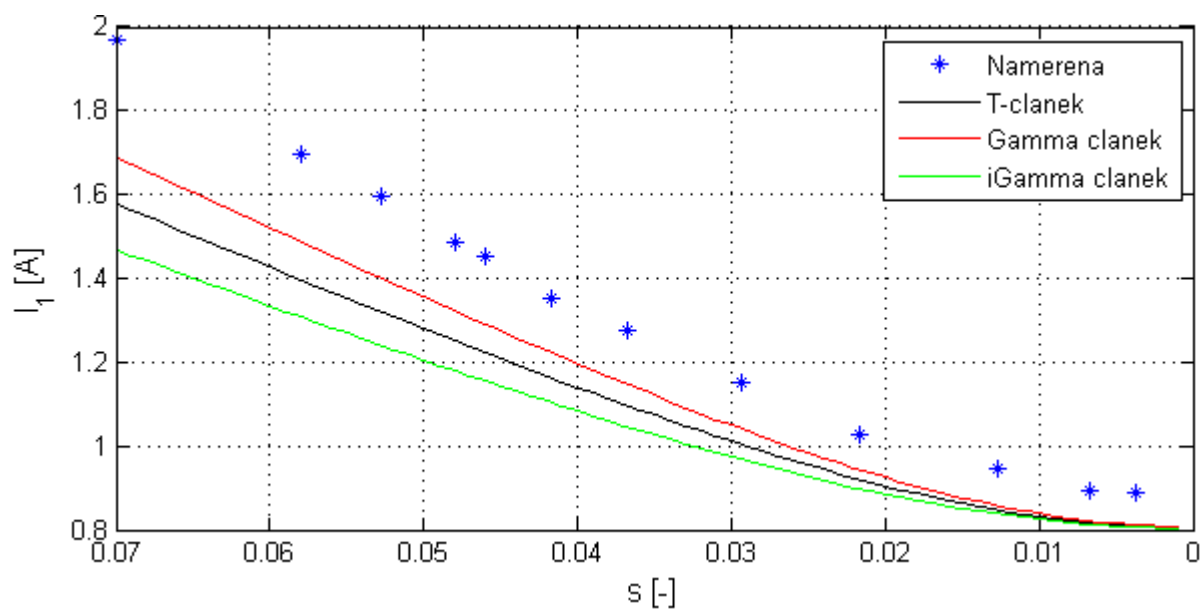
Obr. 7-5: Naměřená pracovní oblast zatěžovací charakteristiky motoru ATAS T22VT512 (7-0512)

Na Obr. 7-6, resp. Obr. 7-7 je dále možno vidět srovnání naměřené pracovní oblasti zatěžovacích charakteristik pro daný motor s vypočtenými charakteristikami pro jednotlivá zapojení:

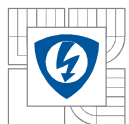


Obr. 7-6: Srovnání pracovních oblastí naměřené momentové charakteristiky s vypočtenými





Obr. 7-7: Srovnání pracovních oblastí naměřené proudové charakteristiky s vypočtenými



## 8 ZÁVĚR

Práce je rozdělena do několika částí.

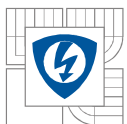
V první části (kapitola 2) je zobrazen obvodový model asynchronního motoru ve tvaru T-článku, na kterém jsou demonstrovány parametry asynchronního motoru a veličiny nezbytné pro jejich stanovení. Parametry jsou zde jednotlivě zmíněny, a to včetně jejich výpočtu ze zkoušek motoru platných pro výchozí zapojení článku, v případě odporu vstupního vinutí pak i ukázán způsob měření. Součástí kapitoly jsou také přepočítávací činitelé napětí, proudů a impedancí jak pro motor s klecovým vinutím tak i pro motor s kotvou kroužkovou.

Hlavní část práce je věnována jednotlivým druhům náhradních zapojení, pro něž je postupně provedeno odvození závislostí statorového proudu a momentu na skluzu. Součástí odvození je také zobrazení výsledného průběhu (vyjma výchozího článku) pro konkrétní parametry motoru T22VT512 (7-0512) firmy ATAS Elektromotory Náchod a. s. zjištěné z praktického měření. Z vyobrazených průběhů statorových proudů a momentů lze sledovat značnou podobnost mezi jednotlivými zapojeními. Složitost samotných vztahů pro stanovení těchto závislostí je značně rozdílná. V kapitole 3 je možné vidět, že funkce  $M = f(s)$  a  $I_1 = f(s)$  jsou v případě T-článku zdaleka nejkomplikovanější vlivem nacházejících se dvou rozptylových indukčností v náhradním zapojení, zatímco zapojení  $\Gamma$  a I-článku jsou citelně jednodušší. Pro uvažovaná náhradní zapojení je také odvozeno stanovení parametrů příčné větve.

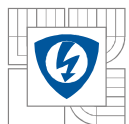
V kapitole 4 jsou jmenovány tři provozní stavy asynchronního motoru – chod nakrátko, naprázdno a při zatížení. Každý provozní stav je typický informacemi, které o stroji dokáže poskytnout. Zatímco díky chodu nakrátko lze zjistit parametry podélné větve a při chodu naprázdno parametry příčné větve, chod při zatížení podává informace o vhodnosti použití daného motoru do konkrétního prostředí.

V rámci práce bylo uskutečněno také praktické měření na dvojpólovém motoru ATAS Elektromotory Náchod a. s. T22VT512 (7-0512) se jmenovitým výkonem 0,6 kW, napětím 400V-Y a účínkem 0,83. Na tomto motoru bylo provedeno měření při chodu naprázdno, resp. s velmi malým skluzem. Z naměřených údajů byl učiněn výpočet odporu reprezentujícího ztráty v železe a hlavní magnetizační indukčnosti ze vztahů pro T,  $\Gamma$  a I-článek odvozených v kapitole 3. Získané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5 a jak lze vidět, jsou pro každé náhradní zapojení jedinečné. Dále bylo realizováno také měření nakrátko, ze kterého byly zjištěny parametry přímým výpočtem z naměřených hodnot, a změřeny zatěžovací charakteristiky, které jsou posléze srovnány s vypočtenými.

Poslední část je věnována samotnému porovnání charakteristik naměřených s vypočtenými z náhradního schématu. Pro zobrazení charakteristik v celém rozsahu bylo nutné vykonat měření při sníženém napětí a následně potřebné parametry na hodnotu při jmenovitém napětí přepočítat. Na vlastní průběh závislosti zjišťované při sníženém napětí měla v tomto ohledu největší vliv teplota motoru a chyba způsobená rozdílným sycením magnetického obvodu motoru. V rámci měření pracovní oblasti zatěžovacích charakteristik při jmenovitém napětí vliv neúplného sycení obvodu odpadá. Veškeré simulace jsou provedeny s respektováním napěťové závislosti

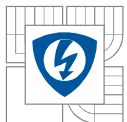


parametrů příčné větve. Rozdílnost charakteristik platných pro jednotlivé články je způsobena tím, že napěťová závislost parametrů příčné větve je dána proložením změřených úseků funkcí. To znamená, že každý odklon naměřené hodnoty od skutečné způsobuje určitou odchylku při přepočtu parametrů pro konkrétní článek a tím i odchylku ve výsledné funkci.



## LITERATURA

- [1] ROUBÍČEK, O. *Elektrické motory a pohony: Příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. Praha: BEN, 2004, 192 s.
- [2] BAŠTA, J., CHLÁDEK, J., MAYER, I. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL/ALFA, 1968, 584 s.
- [3] PATOČKA, M. *Skripta: Vybrané statě z výkonové elektroniky: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulsní měniče s transformátorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008 [cit. 2013-11-30].
- [4] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 2. dopl. vyd. Praha: Academia, 1982, 732 s.
- [5] STÝSKALA, V., DUDEK, J. *Elektrické stroje – Asynchronní motory* [online]. 2007 [cit. 2013-11-30]. Dostupný z WWW: <[http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/1\\_AM\\_FS.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/1_AM_FS.pdf)>.
- [6] ONDRŮŠEK, Č. *Skripta: Elektrické stroje*, [cit. 2013-11-30].
- [7] CIPÍN, R. *Moderní matematické metody syntézy a analýzy střídavých strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012 [cit. 2013-11-30], 120 s. Vedoucí dizertační práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.



## PŘÍLOHY

### P-1: Odvození závislosti statorového proudu na skluzu pro výchozí článek

Statorový proud je dán poměrem vstupního napětí a celkové impedance:

$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}} = \frac{U_1}{\frac{\frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_\mu}{R_{Fe} + j\omega L_\mu} \cdot \left(R_1 + \frac{R'}{s} + j\omega L_{\sigma 1} + j\omega L'_{\sigma 2}\right)}{\frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_\mu}{R_{Fe} + j\omega L_\mu} + \left(R_1 + \frac{R'}{s} + j\omega L_{\sigma 1} + j\omega L'_{\sigma 2}\right)}}, \quad (\text{P-1.1})$$

a po úpravě je získáno:

$$I_1 = U_1 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{R_{Fe} R_1 \cdot j\omega L_\mu + R_{Fe} \frac{R'}{s} \cdot j\omega L_\mu - \omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} - \omega^2 L'_{\sigma 2} L_\mu}, \quad (\text{P-1.2})$$

kde koeficienty  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$ :

$$\alpha_1 = R_{Fe} \cdot j\omega L_\mu + R_1 \cdot j\omega L_\mu + \frac{R'}{s} \cdot j\omega L_{\sigma 1} + R_{Fe} \cdot j\omega L_{\sigma 1}$$

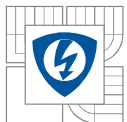
$$\alpha_2 = R_{Fe} \cdot j\omega L'_{\sigma 2} + R_{Fe} R_1 - \omega^2 L_{\sigma 1} L_\mu - \omega^2 L'_{\sigma 2} L_\mu + R_{Fe} \frac{R'}{s}$$

Vytknutím členu  $\omega R_{Fe} L_\mu$  v čitateli i jmenovateli a jeho následným vykrácením je výsledný výraz:

$$I_1 = U_1 \frac{\left(j + j \frac{R_1}{R_{Fe}} + j \frac{R'}{s R_{Fe}} + j \frac{L_{\sigma 1}}{L_\mu} + j \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R_1}{\omega L_\mu} + \frac{R'}{s \omega L_\mu} - \frac{\omega L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)}{\left(j R_1 + j \frac{R'}{s} - \omega \frac{L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \omega \frac{L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)}, \quad (\text{P-1.3})$$

jehož absolutní hodnotou získáváme závislost statorového proudu na skluzu:

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} + \frac{R'}{s R_{Fe}} + \frac{L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu}\right)^2 + \left(\frac{R_1}{\omega L_\mu} + \frac{R'}{s \omega L_\mu} - \frac{\omega L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'}{s}\right)^2 + \left(-\omega \frac{L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \omega \frac{L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2}} \quad (\text{P-1.4})$$



## P-2: Odvození závislosti statorového proudu na skluzu pro T-článek

Stejně jako v předchozím případě je statorový proud dán poměrem statorového napětí a celkové impedance, po vyjádření tedy:

$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{\alpha_3 + \alpha_4}{js\omega R_{Fe}L_\mu + js\omega R_{Fe}L'_{\sigma 2} - s\omega^2 L_\mu L'_{\sigma 2} + R_{Fe}R' + j\omega L_\mu R'}} , \quad (P-2.1)$$

kde koeficienty  $\alpha_3, \alpha_4$ :

$$\alpha_3 = -s\omega^2 R_{Fe}L_\mu L'_{\sigma 2} - s\omega^2 R_1 L_\mu L'_{\sigma 2} + j\omega R_{Fe}R' L_\mu + js\omega R_{Fe}R_1 L_\mu + js\omega R_{Fe}R_1 L'_{\sigma 2} + R_{Fe}R' R_1$$

$$\alpha_4 = -js\omega^3 L_\mu L'_{\sigma 2} L_{\sigma 1} - s\omega^2 R_{Fe}L_\mu L_{\sigma 1} - s\omega^2 R_{Fe}L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} - \omega^2 R' L_\mu L_{\sigma 1} + j\omega R' R_1 L_\mu + j\omega R_{Fe}R' L_{\sigma 1}$$

Po vytknutí členu  $\omega R_{Fe}L_\mu$  v čitateli i ve jmenovateli, jeho následným vykrácením a úpravou získáno:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \left( js + js \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + j \frac{R'}{R_{Fe}} - s\omega \frac{L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{R'}{\omega L_\mu} \right)}{\alpha_5 + \alpha_6} , \quad (P-2.2)$$

koeficienty  $\alpha_5$  a  $\alpha_6$ :

$$\alpha_5 = jR' + jsR_1 + js \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{L_\mu} - js\omega^2 \frac{L'_{\sigma 2} L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} + j \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + j \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu}$$

$$\alpha_6 = -s\omega L'_{\sigma 2} - s\omega \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s\omega L_{\sigma 1} - s\omega \frac{L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{L_\mu} - \omega \frac{R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}}$$

Absolutní hodnota:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left( s + s \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R'}{R_{Fe}} \right)^2 + \left( \frac{R'}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} \right)^2}}{\sqrt{\alpha_7 + \alpha_8}} , \quad (P-2.3)$$

koeficienty  $\alpha_7$  a  $\alpha_8$ :

$$\alpha_7 = \left( R' + sR_1 + s \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} \right)^2$$

$$\alpha_8 = \left( \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} - s \frac{\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{L_\mu} - \frac{\omega R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - s\omega L'_{\sigma 2} - s\omega L_{\sigma 1} \right)^2$$



### P-3: Odvození závislosti momentu na skluzu pro T-článek

Pro zjištění závislosti momentu na skluzu je nejdříve potřeba určit hodnotu napětí  $U_2$  (viz. Obr. 3-5). Tu zjistíme jednoduše pomocí vztahu pro napěťový dělič:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}}{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1}, \quad (\text{P-3.1})$$

po úpravě pak:

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot \frac{-s\omega^2 R_{Fe} L_\mu L'_{\sigma 2} + j\omega R_{Fe} R' L_\mu}{js\omega R_{Fe} L_\mu + js\omega R_{Fe} L'_{\sigma 2} - s\omega^2 L_\mu L'_{\sigma 2} + R_{Fe} R' + j\omega R' L_\mu}}{\frac{-s\omega^2 R_{Fe} L_\mu L'_{\sigma 2} + j\omega R_{Fe} R' L_\mu}{js\omega R_{Fe} L_\mu + js\omega R_{Fe} L'_{\sigma 2} - s\omega^2 L_\mu L'_{\sigma 2} + R_{Fe} R' + j\omega R' L_\mu} + R_1 + j\omega L_{\sigma 1}} \quad (\text{P-3.2})$$

Konečnou úpravou je získáno:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{jR' - s\omega L'_{\sigma 2}}{\alpha_9 + \alpha_{10}}, \quad (\text{P-3.3})$$

koeficienty  $\alpha_9$  a  $\alpha_{10}$ :

$$\alpha_9 = -\frac{js\omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} - s\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} \left( \frac{1}{L_{\sigma 1}} + \frac{R_1}{R_{Fe} L_{\sigma 1}} + \frac{1}{L'_{\sigma 2}} + \frac{1}{L_\mu} + \frac{R'}{sR_{Fe} L'_{\sigma 2}} \right)$$
$$\alpha_{10} = jR_1 \left( \frac{R'}{R_1} + s + \frac{sL'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{R_1 L_\mu} + \frac{R'}{R_{Fe}} \right) + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu}$$

Ze znalosti napětí  $U_2$  je vypočten rotorový proud přepočtený na stranu statoru  $I'_2$ :

$$I'_2 = \frac{U_2}{Z_3}, \quad (\text{P-3.4})$$

Tedy:

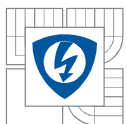
$$I'_2 = U_1 \cdot \frac{\frac{jR' - s\omega L'_{\sigma 2}}{\alpha_9 + \alpha_{10}}}{\frac{js\omega L'_{\sigma 2} + R'}{s}} \quad (\text{P-3.5})$$

Po úpravách:

$$I'_2 = U_1 \cdot \frac{\left( \frac{jR'}{\omega L'_{\sigma 2}} - s \right)}{j \cdot \alpha_{11} + \alpha_{12}}, \quad (\text{P-3.6})$$

kde koeficienty  $\alpha_{11}$  a  $\alpha_{12}$ :

$$\alpha_{11} = \left[ (-s\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} - R' L_{\sigma 1}) \left( \frac{1}{L_{\sigma 1}} + \frac{R_1}{R_{Fe} L_{\sigma 1}} + \frac{1}{L'_{\sigma 2}} + \frac{1}{L_\mu} + \frac{R'}{sR_{Fe} L'_{\sigma 2}} \right) + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} + \frac{R'^2 R_1}{s\omega^2 L_\mu L'_{\sigma 2}} \right]$$



$$\alpha_{12} = \left[ \left( -R_1 - \frac{R' R_1}{s \omega L'_{\sigma 2}} \right) \left( \frac{R'}{R_1} + s + \frac{s L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{R_1 L_\mu} + \frac{R'}{R_{Fe}} \right) + \frac{s \omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{\omega L_{\sigma 1} R'}{R_{Fe}} \right]$$

Absolutní hodnota rotorového proudu přepočteného na stranu statoru:

$$I'_2 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left( \frac{R'}{\omega L'_{\sigma 2}} + s \right)^2}}{\sqrt{\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2}} \quad (\text{P-3.7})$$

Nyní jsou známy veličiny potřebné pro výpočet momentu:

$$M = \frac{m \cdot \frac{R'}{s} \cdot I_2'^2}{\omega_1}, \quad (\text{P-3.8})$$

Výsledná závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku:

$$M = \frac{3 U_1^2 \cdot \frac{R'}{s} \cdot \left( \frac{R'}{\omega L'_{\sigma 2}} + s \right)^2}{\omega_1 \cdot (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2)} \quad (\text{P-3.9})$$

#### P-4: Odvození závislosti statorového proudu na skluzu pro T-článek

Poměr statorového napětí a celkové impedance obvodu (z Obr. 3-13):

$$I_1 = \frac{U_1}{\left( \frac{\frac{R_{Fe} \cdot j \omega L_\mu}{R_{Fe} + j \omega L_\mu} \cdot \frac{R'}{s}}{\frac{R_{Fe} \cdot j \omega L_\mu}{R_{Fe} + j \omega L_\mu} + \frac{R'}{s}} \right) + (R_1 + j \omega L_{\sigma 1})}, \quad (\text{P-4.1})$$

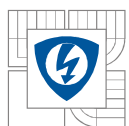
a po úpravě:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \left( js + j \frac{R'}{R_{Fe}} + \frac{R'}{\omega L_\mu} \right)}{\left[ \left( j R' + js R_1 + j \frac{R_1 R'}{R_{Fe}} + j \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} + j \frac{R_1 R'}{\omega L_\mu} \right) + \left( \frac{R_1 R'}{\omega L_\mu} - s \omega L_{\sigma 1} - \frac{\omega R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} \right) \right]} \quad (\text{P-4.2})$$

je absolutní hodnota:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left( s + \frac{R'}{R_{Fe}} \right)^2 + \left( \frac{R'}{\omega L_\mu} \right)^2}}{\sqrt{\left( R + s R_1 + \frac{R_1 R'}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{R_1 R'}{\omega L_\mu} \right)^2 + \left( \frac{R_1 R'}{\omega L_\mu} - s \omega L_{\sigma 1} - \frac{\omega R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} \right)^2}} \quad (\text{P-4.3})$$





## P-5: Parametry motoru

Štítkové parametry motoru ATAS T22VT512 (7-0512):

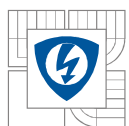
Štítkové hodnoty		
Jmenovitý výkon	0,6	[kW]
Jmenovité napětí	400-Y	[V]
Jmenovitý proud	1,6	[A]
Otáčky	2830	[min <sup>-1</sup> ]
Účinník	0,83	[-]
Frekvence	50	[Hz]
Hmotnost	29	[kg]
Stupeň krytí	IP 56	
Výrobní číslo	720328/10	

## P-6: Celkové výsledky zatěžovací charakteristiky

Veškeré hodnoty z rozsahu měření zatěžovací charakteristiky shrnuje Tab. 3. Prvky  $M'_i$  a  $I'$  jsou výsledné hodnoty získané přepočtem na jmenovité napětí.

Tab. 3: Celkové výsledky zatěžovací charakteristiky pro motor ATAS T22VT512 (7-0512)

U [V]	I [A]	P [W]	$M_h$ [Nm]	$M_t$ [Nm]	$M_i$ [Nm]	n [min <sup>-1</sup> ]	s [-]	$M'_i$ [Nm]	$I'$ [A]
202,037	3,533	928,400	1,092	0,000	1,092	0,000	1,000	4,280	6,995
202,360	3,387	915,200	1,030	0,096	1,126	200,000	0,933	4,400	6,695
202,640	3,280	898,200	1,018	0,107	1,125	400,000	0,867	4,384	6,474
202,787	3,234	882,200	1,002	0,119	1,121	600,000	0,800	4,362	6,378
202,750	3,123	860,400	1,012	0,128	1,140	800,000	0,733	4,437	6,161
202,977	3,037	839,700	1,022	0,135	1,157	1000,000	0,667	4,493	5,986
203,230	2,904	816,900	1,048	0,141	1,189	1200,000	0,600	4,606	5,716
203,760	2,769	793,000	1,075	0,146	1,221	1400,000	0,533	4,705	5,436
203,753	2,613	760,300	1,103	0,151	1,254	1600,000	0,467	4,833	5,130
204,220	2,438	723,100	1,123	0,153	1,276	1800,000	0,400	4,895	4,775
204,620	2,236	676,200	1,131	0,159	1,290	2000,000	0,333	4,930	4,372
204,857	1,988	613,000	1,111	0,163	1,274	2200,000	0,267	4,857	3,881
205,260	1,846	575,600	1,087	0,166	1,253	2300,000	0,233	4,758	3,597
205,283	1,682	528,900	1,037	0,166	1,203	2400,000	0,200	4,567	3,278
205,863	1,504	477,600	0,974	0,166	1,140	2500,000	0,167	4,304	2,922
205,660	1,295	412,400	0,868	0,167	1,035	2600,000	0,133	3,915	2,518
206,283	1,058	336,900	0,710	0,167	0,877	2700,000	0,100	3,298	2,051
206,817	0,792	246,300	0,491	0,172	0,663	2800,000	0,067	2,480	1,531
207,473	0,506	138,300	0,204	0,174	0,378	2900,000	0,033	1,405	0,976
207,720	0,381	78,300	0,028	0,174	0,202	2950,000	0,017	0,749	0,733



## P-7: Celkové výsledky měření naprázdno

Veškeré výsledky při měření naprázdno ukazuje Tab. 4.

Tab. 4: Výsledky měření naprázdno pro motor ATAS T22VT512 (7-0512)

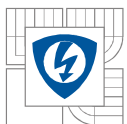
$U_{10}$ [V]	$I_{10}$ [A]	$P_{10}$ [W]	$\cos\varphi_{10}$ [-]	$R_{Fe}$ [ $\Omega$ ]	$X_{\mu}$ [ $\Omega$ ]	$L_{\mu}$ [H]
450,770	1,347	109,440	0,104	1856,497	194,317	0,619
423,457	1,056	72,270	0,093	2480,573	232,451	0,740
401,160	0,881	58,000	0,095	2774,815	263,961	0,840
375,183	0,738	45,420	0,095	3099,672	294,864	0,939
352,757	0,650	37,530	0,095	3317,187	314,883	1,002
328,223	0,573	26,040	0,080	4135,143	331,875	1,056
301,317	0,504	18,410	0,070	4930,336	345,972	1,101
273,853	0,445	12,560	0,060	5969,670	355,826	1,133
252,557	0,405	11,180	0,063	5700,135	360,397	1,147
223,730	0,346	10,040	0,075	4981,918	374,197	1,191
203,187	0,307	9,010	0,084	4581,722	383,915	1,222
173,920	0,254	6,980	0,091	4334,144	396,928	1,263
149,373	0,214	5,880	0,106	3791,692	405,354	1,290
127,403	0,182	5,940	0,148	2730,477	408,046	1,299
103,340	0,149	4,390	0,165	2434,667	406,795	1,295
82,343	0,125	3,380	0,190	2006,482	387,457	1,233

## P-8: Naměřené a vypočtené hodnoty odporu $R_{Fe}$

Srovnání hodnot odporů  $R_{Fe}$  ze zkoušky naprázdno přímým výpočtem a výpočtem pro zapojení jednotlivých článků představuje Tab. 5.

Tab. 5: Srovnání hodnot odporu  $R_{Fe}$  získaného přímým výpočtem a výpočtem pro jednotlivá náhradní zapojení pro různá vstupní napětí motoru ATAS T22VT512 (7-0512)

Přímý výpočet z měření		$\Gamma$ -článek	T-článek	T-článek
$U_{10}$ [V]	$R_{Fe}$ [ $\Omega$ ]	$R_{Fe}$ [ $\Omega$ ]	$R_{Fe}$ [ $\Omega$ ]	$R_{Fe}$ [ $\Omega$ ]
450,770	1856,497	4942,720	4255,709	3620,165
423,457	2480,573	5934,562	5242,218	4592,871
401,160	2774,815	5597,448	5020,497	4474,991
375,183	3099,672	5645,814	5123,639	4626,870
352,757	3317,187	5748,826	5250,311	4774,471
328,223	4135,143	7874,775	7226,952	6606,983
301,317	4930,336	10294,807	9482,378	8703,376
273,853	5969,670	14795,923	13660,870	12571,136
252,557	5700,135	12814,475	11843,432	10910,675
223,730	4981,918	9055,246	8393,429	7756,769
203,187	4581,722	7545,158	7007,153	6489,098
173,920	4334,144	6640,207	6181,808	5739,863



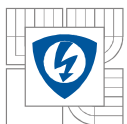
149,373	3791,692	5346,537	4984,684	4635,583
127,403	2730,477	3435,482	3203,916	2980,546
103,340	2434,667	2981,396	2779,624	2585,055
82,343	2006,482	2404,556	2233,518	2068,957

### P-9: Naměřené a vypočtené hodnoty indukčnosti $L_\mu$

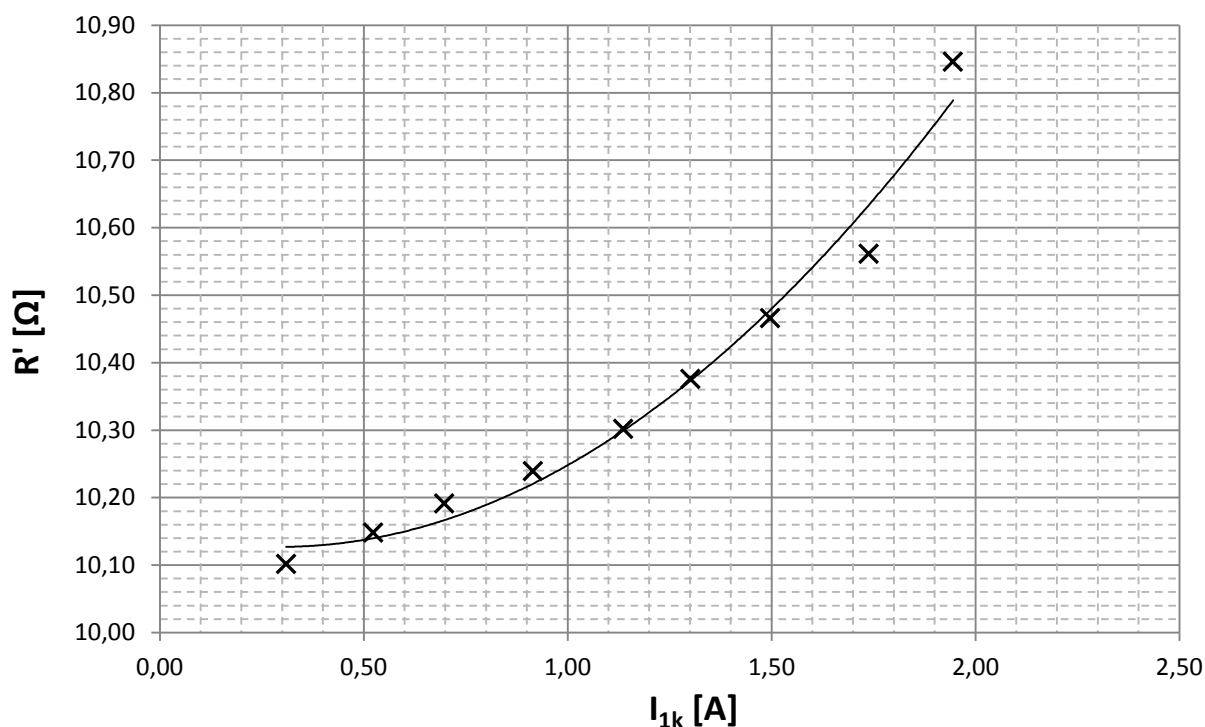
Srovnání hodnot indukčnosti  $L_\mu$  ze zkoušky naprázdno přímým výpočtem a výpočtem pro zapojení jednotlivých článků představuje Tab. 6.

Tab. 6: Srovnání hodnot indukčnosti  $L_\mu$  získané přímým výpočtem a výpočtem pro jednotlivá náhradní zapojení pro různá vstupní napětí motoru ATAS T22VT512 (7-0512)

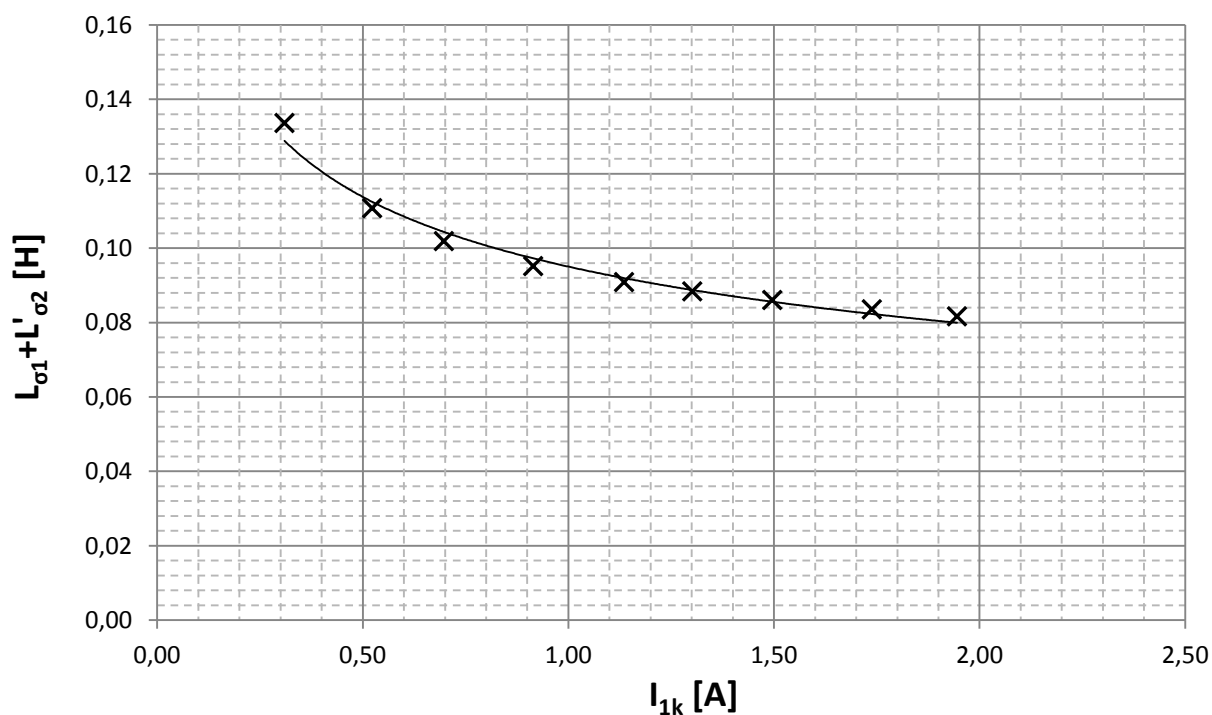
Přímý výpočet z měření		$\Gamma$ -článek	T-článek	$\Pi$ -článek
$U_{I0}$ [V]	$L_\mu$ [H]	$L_\mu$ [H]	$L_\mu$ [H]	$L_\mu$ [H]
450,770	0,619	0,613	0,569	0,525
423,457	0,740	0,735	0,690	0,646
401,160	0,840	0,835	0,790	0,746
375,183	0,939	0,933	0,889	0,845
352,757	1,002	0,996	0,952	0,908
328,223	1,056	1,051	1,007	0,963
301,317	1,101	1,097	1,053	1,009
273,853	1,133	1,129	1,085	1,041
252,557	1,147	1,144	1,099	1,055
223,730	1,191	1,186	1,142	1,098
203,187	1,222	1,217	1,173	1,129
173,920	1,263	1,257	1,213	1,169
149,373	1,290	1,283	1,239	1,195
127,403	1,299	1,288	1,245	1,201
103,340	1,295	1,283	1,239	1,196
82,343	1,233	1,219	1,176	1,133



### P-10: Proudová závislost změřených parametrů podélné větve

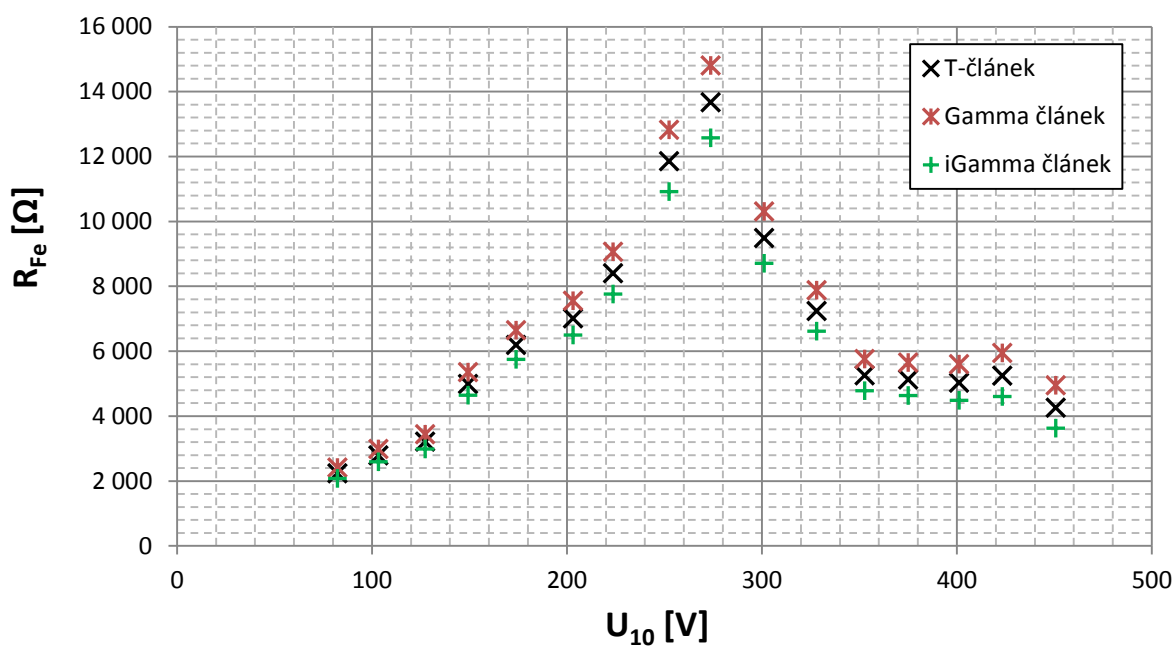


Obr. P- 1: Proudová závislost odporu  $R'$

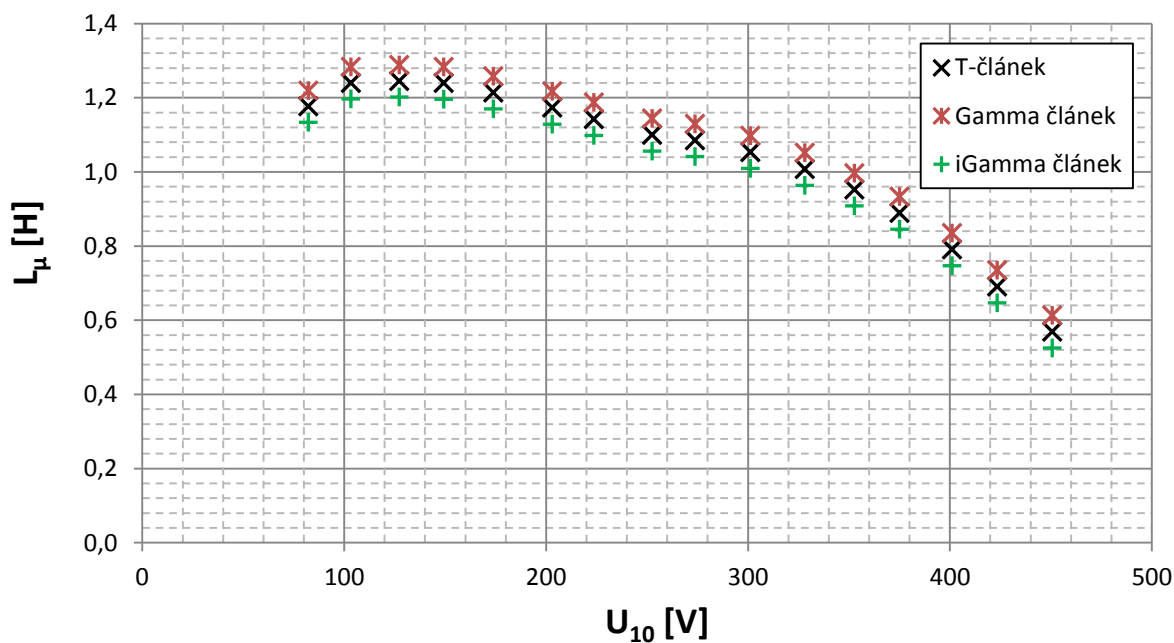


Obr. P- 2: Proudová závislost rozptylových indukčností  $L_{\sigma 1}$  a  $L'_{\sigma 2}$

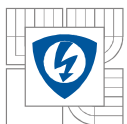
## P-11: Napěťová závislost vypočtených parametrů příčné větve



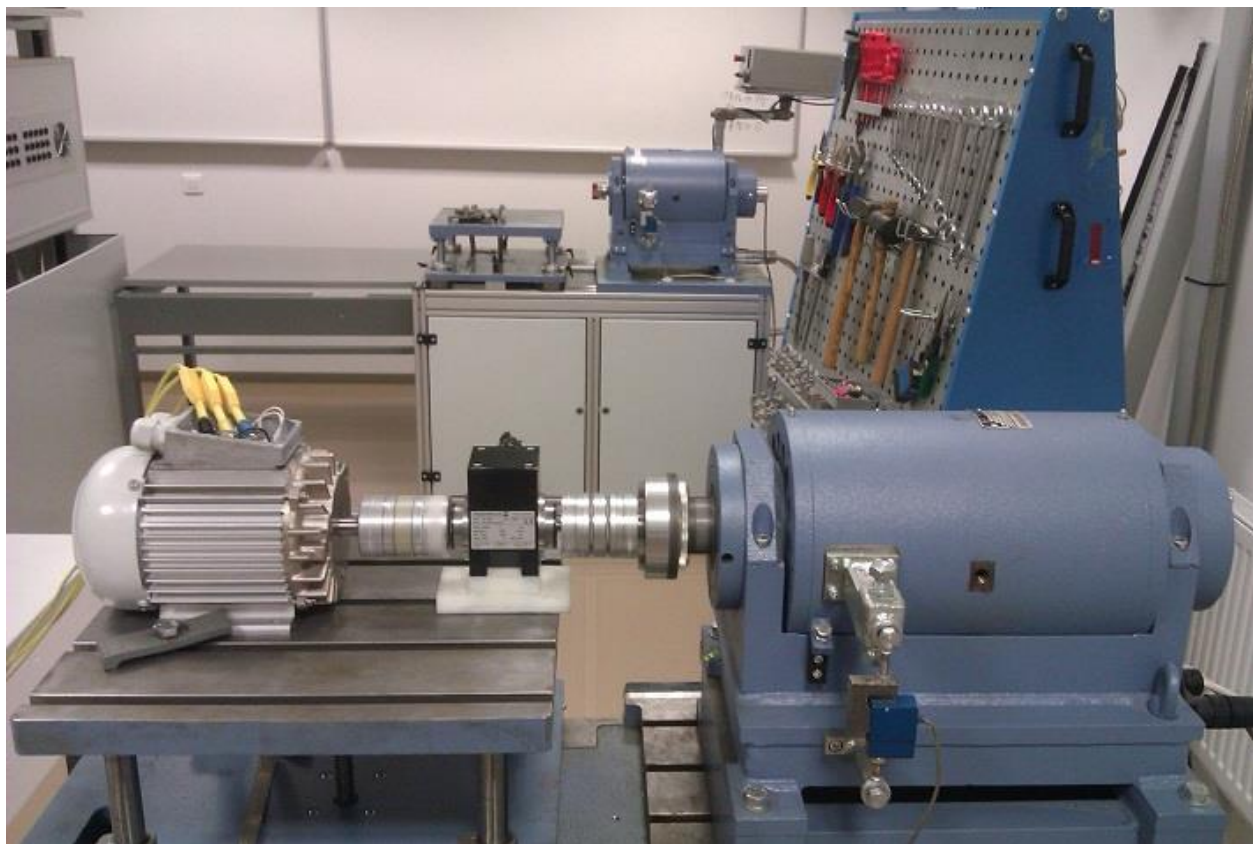
Obr. P- 3: Napěťová závislost vypočteného odporu  $R_{Fe}$  pro jednotlivá náhradní zapojení ASM



Obr. P- 4: Napěťová závislost vypočtené indukčnosti  $L_{\mu}$  pro jednotlivá náhradní zapojení ASM



## P-12: Ukázka měřeného zařízení



*Obr. P- 5: Ukázka pracoviště všech prováděných měření*